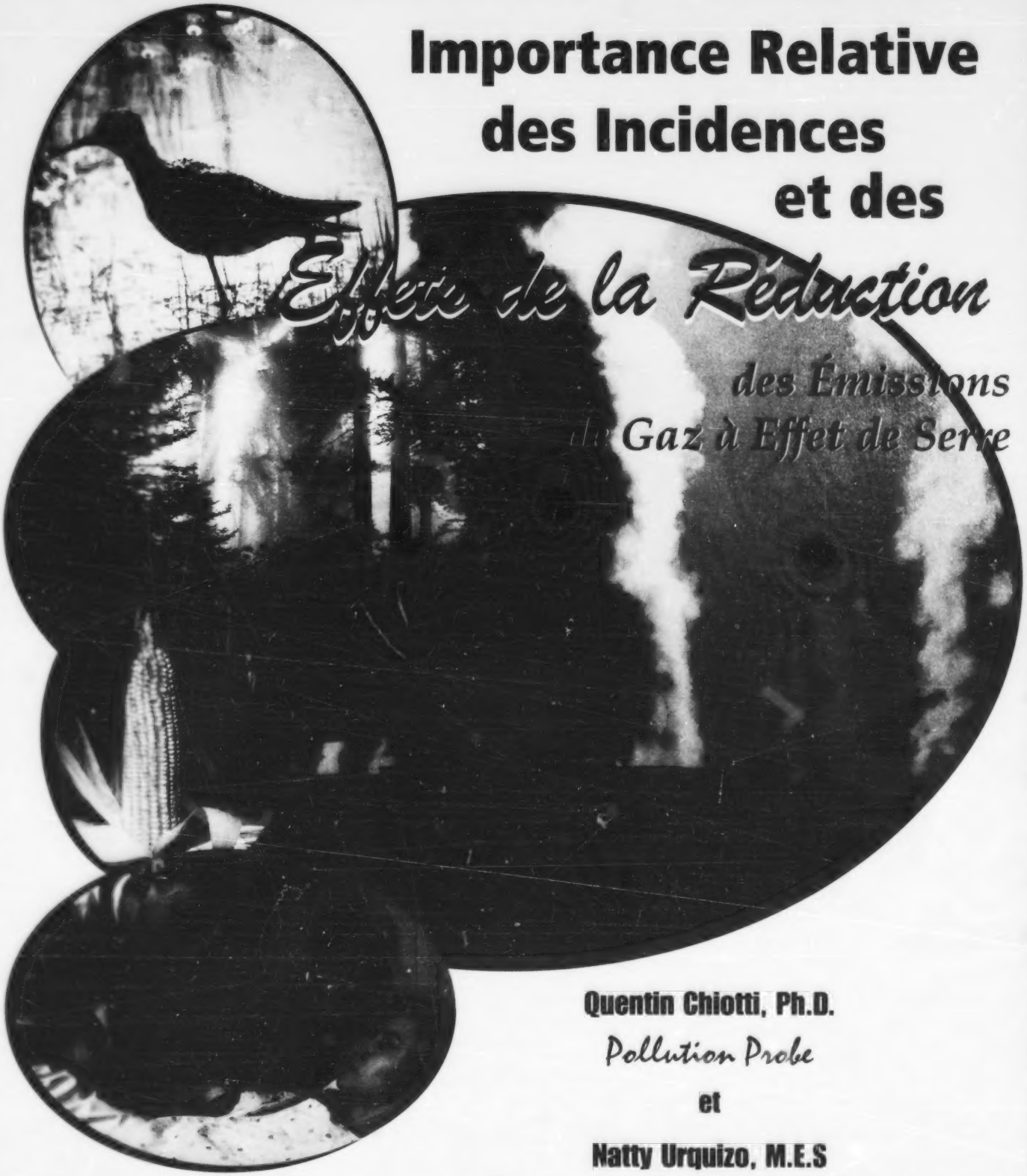


Importance Relative des Incidences et des *Effets de la Réduction*

des Émissions de Gaz à Effet de Serre

Quentin Chiotti, Ph.D.

Pollution Probe

et

Natty Urquizo, M.E.S

Rainmakers Environmental Group

pour

Environnement Canada Environment Canada

POLLUTION PROBE

Rainmakers ENVIRONMENTAL GROUP

Remerciements

Le présent rapport a été financé par la Direction de l'évaluation scientifique et de l'intégration des politiques, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada; par la Direction des questions atmosphériques, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada; et par le Programme de l'environnement atmosphérique (région de l'Ontario), Environnement Canada. Nous désirons remercier particulièrement M. Don MacIver, M. Jay Barclay et Mme Heather Auld pour leurs conseils, leur encouragement et leur soutien.

Nous tenons également à remercier pour les renseignements et l'aide qu'ils ont fournis, M. Abdel Maarouf, Groupe de recherche sur l'adaptation et les répercussions, Environnement Canada; M. Jeff Brook, Division des recherches sur les processus, Environnement Canada; M. Doug Tilden, Évaluation environnementale, Environnement Canada; M. James Mack, Agence canadienne d'évaluation environnementale; M. Dieter Riedel, Santé Canada, MM. Ian Morton et Ken Ogilvie, Enquête pollution. Nous tenons aussi à souligner le travail de M^me^ Roberta McCarthy, bibliothécaire documentaliste, Service de l'environnement atmosphérique, qui a su trouver les documents dont nous avions besoin.

ISBN: 0-662-84600-1
Catalogue No.: En 56-150/2000F

101-04074/

Importance relative des incidences et des effets de la réduction des émissions de gaz à effet de serre

Quentin Chiotti, Ph.D.
Pollution Probe

et

Natty Urquizo, M.E.S.
Rainmakers Environmental Group

pour
Environnement Canada

1999

POLLUTION PROBE

Rainmakers
ENVIRONMENTAL GROUP

Table des matières

Résumé		i
1.0	Buts et objectifs	1
2.0	Contexte scientifique et politique	3
2.1	Incidences des changements climatiques	3
2.2	Réaction aux changements climatiques	6
2.3	Intégration des problèmes atmosphériques	7
3.0	Élaboration d'un cadre analytique	10
3.1	Revue de la littérature	10
3.2	Réaction en matière de recherche	13
	Modélisation quantitative	14
	Évaluations environnementales stratégiques	15
	Document sur l'état actuel des connaissances	15
	Cadre d'évaluation des avantages connexes	16
4.0	Incidence de la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur la pollution atmosphérique et les écosystèmes	19
4.1	Engagements officiels	19
	Réduction des émissions de dioxyde de soufre	19
	Réduction des émissions d'oxydes d'azote	19
	Réductions des concentrations d'ozone troposphérique	19
	Réductions des substances toxiques dans l'atmosphère	21
4.2	Réduction des émissions de GES et concentrations de particules dans l'air ambiant	22
4.3	Réduction des émissions de GES et concentrations d'ozone troposphérique	22
4.4	Réduction des émissions de GES et importance des pluies acides	24
	Écosystèmes aquatiques	24
	Écosystèmes forestiers	27
4.5	Réduction des émissions de GES et concentrations de mercure	27
	Le mercure et les espèces sauvages	28
4.6	Autres substances toxiques	28
4.7	Avantages de la réduction des concentrations de CO_2	29
4.8	Réduction des émissions de GES et baisse du rayonnement UV-B	30

4.9 Réduction des émissions de GES et réduction de la concentration de monoxyde de carbone 32
4.10 Conclusions 32

5.0 Évaluation de l'importance relative des effets 34
5.1 Effets sur l'environnement 34
Foresterie 35
Agriculture 36
5.2 Bien-être collectif 37
5.3 Santé humaine 38
Qualité de l'air et santé humaine 39
Projections des avantages 40
5.4 Facteurs externes 44
Électricité 44
Transports 45
Efficacité énergétique des résidences 46
5.5 Conclusions 46

6.0 Importance de l'échelle 47

7.0 Prochaines étapes – Plan d'action de la phase II 50

Bibliographie 53

Glossaire 61

Importance relative des incidences et des effets d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre

RÉSUMÉ

L'élaboration d'une stratégie nationale efficace pour combattre les changements climatiques constitue un défi de taille sur le plan des politiques pour les signataires du Protocole de Kyoto, y compris le Canada. Au moment de choisir les stratégies d'intervention appropriées pour le Canada, les auteurs de politiques et les décideurs devraient tenir compte de toutes les répercussions des mesures de lutte sur le bien-être de la population. Pour être complète, l'évaluation des avantages nets d'une stratégie devrait inclure l'évaluation des avantages concomitants des mesures qui réduiront directement l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

Le document d'orientation que voici propose une évaluation préliminaire de ce que l'on sait présentement au sujet des avantages concomitants d'une atténuation des changements climatiques. L'évaluation se concentre sur l'importance relative des incidences et des effets d'une réduction des rejets de GES. Un avantage des mesures d'atténuation est que la diminution des émissions de GES entraînera une réduction des rejets d'autres polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les particules, l'ozone troposphérique (O_3), les métaux lourds et d'autres substances toxiques. Ces polluants sont à l'origine d'autres problèmes atmosphériques comme l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, la qualité de l'air et les dépôts acides qui ont de nombreuses retombées négatives sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine. Les avantages découlant d'incidences et d'effets moins importants peuvent aussi venir des mesures visant à réduire les émissions de GES proprement dites. Devant l'ampleur du problème et l'abondance de la documentation sur le sujet, le présent article s'efforcera de donner un premier aperçu des processus complexes, des interactions et des incertitudes qui entourent la question.

Selon des estimations préliminaires, les incidences et les effets des changements climatiques pourraient coûter de 3,5 à 24,5 milliards de dollars par année au Canada, si l'on n'adopte pas de mesures efficaces pour les atténuer ou s'y adapter. À l'échelle planétaire, on estime qu'il faut réduire les émissions de GES de 50 % pour stabiliser ces gaz à leur concentration actuelle dans l'atmosphère. Pour réagir aux changements climatiques, on devra donc s'attarder davantage aux mesures d'adaptation, en plus des mesures d'atténuation qui viennent en aide aux populations localement.

Le Protocole de Kyoto nous donne la chance d'envisager l'atmosphère sous un angle qui combine science et politiques grâce aux mesures visant à réduire les émissions de GES. Les effets nets les plus importants dépendront de maints facteurs, entre autres les interactions des polluants et les questions atmosphériques, mais aussi les mesures spécifiquement destinées à réduire les rejets de GES. Les phénomènes à l'origine des incidences et des effets sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine sont des phénomènes dynamiques. Les liens entre eux peuvent être synergiques, antagonistes ou non linéaires.

Logiquement, l'importance des avantages concomitants des mesures de réduction des rejets de GES dépend notamment de la nature des mesures en question, du degré et de la durée d'exposition aux différents polluants et de la sensibilité de la population exposée. Les bienfaits attribuables aux mesures visant à réduire les émissions de GES s'accumulent à court terme, principalement dans les régions où l'on prévoit également adopter des mesures d'atténuation.

On détermine la diminution de la concentration de tel ou tel polluant au moyen de divers facteurs comme la source des rejets (fixe ou mobile), et le type d'énergie (charbon ou gaz naturel, par exemple). Quelques études américaines situent les réductions de SO_X et de NO_x entre 3 et 32 %, vraisemblablement moins pour le total des

particules en suspension (TPS) et les COV. Les simulations effectuées sur un modèle dans le cadre du plan de gestion des gaz à effet de serre du Climate Action Network de 1995 révèlent qu'une réduction de 6,5 % de CO_2 sous les niveaux de 1990 au Canada, baisseraient les émissions de SO_2 de 24 %, celles de NO_x de 16 % et celles de COV de 13 %.

Aucune étude canadienne n'a recouru aux fonctions dose-réponse pour déterminer les incidences des mesures sur les écosystèmes ou leurs retombées sur l'environnement, le bien-être collectif ou la santé humaine. On n'a donc pas évalué les avantages concomitants d'une réduction des rejets de GES au Canada. Pour combler cette lacune, nous proposons un cadre d'évaluation ayant les particularités suivantes :

- il élargit la gamme de polluants en y incluant tous ceux qui affectent l'atmosphère;
- il tient compte de l'interaction entre les polluants et les questions atmosphériques, y compris des liens cumulatifs, synergiques ou antagonistes;
- il examine la réduction des rejets, ses incidences et ses effets en fonction des objectifs actuels relatifs aux questions atmosphériques;
- il estime les retombées sur l'atmosphère et les écosystèmes (terrestre et aquatique);
- il précise les répercussions sur l'environnement (agriculture et foresterie), sur le bien-être collectif et sur la santé humaine;
- il tient compte des incidences et des effets des mesures proprement dites.

Au Canada, les combustibles fossiles sont la principale source d'émissions de GES, ce qui explique environ 55 % des rejets de SO_2, 90 % des dégagements de NO_x, 55 % des émissions de COV et 90 % du CO libéré dans l'atmosphère. D'importantes politiques concourent déjà à lutter contre la pollution de l'air, notamment l'Accord Canada-États-Unis sur la qualité de l'air qui traite des dépôts acides, de l'ozone troposphérique et des particules. La mise en œuvre d'un plan de réduction des émissions de GES contribuera sensiblement à diminuer les rejets de maints polluants pour lesquels il existe déjà des objectifs de réduction. Les mesures visant à diminuer les émissions de GES pourraient nous aider à atteindre, peut-être même à dépasser les objectifs applicables aux rejets d'autres polluants atmosphériques. Elles pourraient, par exemple, réduire les émissions de SO_2 de plus de 50 %, objectif fixé pour 2010. Considéré dans une perspective intégrée, un plan de réduction des émissions de GES bien pensé engendrera d'autres avantages au niveau des écosystèmes aquatiques et terrestres. Les gains les plus manifestes comprennent une diminution du volume des précurseurs des dépôts acides, des particules dans le milieu ambiant et de l'ozone troposphérique. La plus faible quantité de polluants atmosphériques résultant de la diminution des rejets de GES pourrait néanmoins avoir d'autres avantages. Voici quelques exemples de ces retombées et des avantages qui en découlent :

Atmosphère :

- On soupçonne que les gaz à effet de serre qui interviennent dans la destruction de l'ozone stratosphérique font passer le mercure de l'état gazeux à celui de particules.
- La réduction des rejets de GES pourrait agir sur le transport à grande distance des substances toxiques, si bien que l'effet « bond de sauterelle » serait plus faible que celui qu'on observerait avec le réchauffement de la température à l'échelle de la planète.
- La réduction des émissions de GES contribuera à renverser la tendance à la baisse des concentrations d'oxygène dans l'hémisphère Nord.
- Les aérosols de sulfate combattent le réchauffement planétaire en absorbant et en réfléchissant les rayons solaires et camouflent les élévations de température de plus de 25 % en région.
- La réduction des émissions de GES fera en sorte que moins de CO sera libéré dans l'atmosphère. Il y aura plus de radicaux OH pour réagir avec les gaz comme le méthane (CH_4) et les CFC halogénés, ce qui en raccourcira la durée de vie.

Écosystèmes :

- Une concentration plus faible d'ozone troposphérique s'avérerait particulièrement bénéfique pour les plantes qui sont plus sensibles à ce stress que l'être humain.

- On estime que les dépôts de sulfates et de nitrates atteignent presque la charge critique dans 20 à 30 millions d'hectares de forêts au Canada.

- À cause des dépôts acides, les eaux de drainage emportent une grande quantité de calcium et de magnésium. La fertilité du sol et la productivité des forêts s'en trouvent menacées. Les sols s'appauvrissent rapidement au rythme où les dépôts acides progressent actuellement.

- Les dépôts acides sont étroitement reliés à l'accumulation de mercure dans la chair des poissons. Une réduction accrue des dépôts grâce à la baisse des rejets de GES ne pourrait que profiter aux maillons supérieurs de la chaîne alimentaire.

- La réduction des rejets de SO_2 sous l'objectif de 50 % mentionné dans la politique actuelle grâce à la diminution des émissions de GES pourrait faire en sorte qu'environ 890 000 hectares de lacs dans le sud-est de la région boréale respectent le critère de la charge critique (pH=6,0). Ce faisant, on préviendrait la destruction de 162 000 populations de poissons.

- La réduction des rejets de GES entraînerait une baisse des dépôts acides et une hausse de la concentration de carbone organique dissous, ce qui laisserait moins d'UV-B pénétrer dans les écosystèmes aquatiques.

- La végétation profiterait de la hausse de la concentration de CO_2 davantage si l'on atténuait les effets nocifs des dépôts acides et de l'ozone troposphérique.

Santé humaine :

Ce sont les conséquences d'une meilleure qualité de l'air sur la santé humaine, surtout en ce qui concerne la concentration de particules, qui ont retenu le plus l'attention lors de l'évaluation des conséquences d'une réduction des rejets de GES. Dans la plupart des études sur la question, les bienfaits pour la santé humaine dépassent de plusieurs ordres de grandeur les retombées estimatives sur les écosystèmes et les effets sur l'environnement et le bien-être collectif. On accorde ainsi beaucoup plus de valeur aux décès prématurés évités qu'à la réduction de la morbidité. Au Maryland, par exemple, les avantages ont été évalués à 116,80 $US par habitant pour la mortalité humaine contre 5,60 $US pour la morbidité et de 1,60 à 2,00 $US pour l'amélioration de la visibilité.

Lorsqu'on élargit la recherche bibliographique toutefois, on constate que la plupart des estimations des avantages concomitants paraissent prudentes. Tout d'abord, nous en savons beaucoup plus long sur les incidences et les effets qui ne se rapportent pas à la santé qu'on ne l'a indiqué dans les analyses antérieures. Deuxièmement, les mesures visant à réduire les émissions de GES proprement dites (c'est-à-dire les mesures qui n'agissent pas directement sur les rejets) engendrent des coûts externes et des avantages supplémentaires pour les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine. En troisième lieu, on ne possède pas assez de renseignements sur ces incidences et ces effets pour estimer la valeur des bienfaits. De ce qui précède, on tire deux grandes conclusions : i) l'importance générale des avantages dépasse ce qu'on avait d'abord envisagé; ii) l'importance relative des incidences et des effets qui ne se rapportent pas à la santé est plus grand qu'on ne l'avait cru au départ.

Pour évaluer l'importance relative des effets sur l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine, il importe de tenir compte de ce qui suit :

- Les dépôts acides ont plus d'effets sur les forêts que l'ozone troposphérique.

- L'ozone troposphérique touche plus l'agriculture que les dépôts acides.

- En termes comparatifs, on en sait plus au sujet des retombées des dépôts acides sur les forêts que de tout autre stress atmosphérique comme l'ozone troposphérique et les UV-B.

- On estime que les dépôts acides diminuent la productivité des forêts de 10 %.

- Réduire la concentration saisonnière moyenne d'ozone troposphérique à 35 ppb ou en deçà rapporterait entre 17 et 70 millions de dollars par année en Ontario grâce à une meilleure productivité agricole.

- La diminution des rejets de GES (en particulier de SO_2, de NO_3, d'O_3 et de particules) aura un effet bénéfique sur le bien-être collectif en améliorant la visibilité et en atténuant la pollution et la détérioration du matériel.

- Des études récentes concernant les effets de la pollution de l'air sur la santé dans les villes canadiennes révèlent que le mélange de polluants dans l'air ambiant (qui inclut tous les gaz) est plus dommageable que les P_{10} et même les $P_{2,5}$. De tous les polluants courants, le NO_2 est celui qui agit le plus sur la mortalité puisqu'il l'accroît de 4,1 %. Suivent l'ozone troposphérique (1,8 %), le SO_2 (1,4 %) et le CO (0,9 %).

- Chaque année, 16 000 personnes meurent prématurément à cause de la pollution de l'air au Canada. Dans le sud de l'Ontario, les particules sont à l'origine de 1 800 décès prématurés.

- Des études estiment que si les pays industrialisés réduisaient leurs émissions de GES de 15 % comparativement aux niveaux de 1990 d'ici 2010 et si les pays en développement les réduisaient de 10 %, les rejets plus faibles de particules qui en résulteraient auraient sauvé un peu plus de 700 000 personnes par année d'une mort prématurée dans le monde en 2020.

- On situe le nombre de décès prématurés évités à 138 000 dans les pays industrialisés, dont 33 000 aux États-Unis. Par extension, 3 300 personnes au Canada verraient leur vie prolongée.

- Cette estimation, pour les États-Unis, correspond au nombre de décès attribuables à l'immunodéficience humaine ou aux maladies chroniques du foie. Il s'agit néanmoins d'estimations prudentes, car elles ne reposent que sur les particules et elles sous-estiment le nombre de décès qui pourraient être évités et la réduction du taux de morbidité si l'on tenait compte de tous les polluants courants comme le NO_2, le SO_2, l'ozone troposphérique et le CO.

- Il est difficile d'étayer les chiffres relatifs à la réduction de la morbidité; la documentation pourrait donc sous-estimer les bienfaits résultant de cette dernière.

- Selon la source, la réduction des rejets de GES pourrait aussi déboucher sur une diminution des émissions de substances toxiques dans l'air. On sait, par exemple, que les polluants toxiques comme l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb et le mercure causent le cancer ou sont neurotoxiques dans certains cas. En Ontario, produire de l'électricité avec du gaz naturel au lieu du charbon couperait les rejets de SO_2 de 83 %, en plus de diminuer d'autant les émissions des produits toxiques de l'air.

Les mesures visant à réduire les émissions de GES peuvent aussi avoir une incidence et des effets sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine. En voici quelques exemples :

- L'abandon des véhicules ne transportant qu'un passager pour des moyens de transport en commun aura des effets bénéfiques sur la santé puisqu'on assistera à une diminution du nombre de décès attribuables aux accidents de la circulation. D'autres avantages comprennent une réduction du bruit, des embouteillages et de la consommation des ressources naturelles. Enfin, on contribuerait à préserver des terres fertiles pour l'agriculture.

- Dans les pays industrialisés, les coûts externes globaux du transport terrestre peuvent représenter jusqu'à 5 % du PIB, répartis comme suit : pollution de l'air (sans le réchauffement de la planète), 0,4 %; bruit, 0,2 %; accidents, 1,5 %; embouteillages, 2,0 %.

- Des habitations et des immeubles commerciaux à meilleur rendement énergétique amélioreront aussi la qualité de l'air intérieur. Si l'on combine à cela de meilleures normes de construction, les habitations et les bâtiments résisteront mieux aux retombées des changements climatiques (p. ex., phénomènes météorologiques exceptionnels).

Ce document est un « ouvrage de référence » utile, car il facilite l'évaluation des avantages concomitants. Les groupes de concertation qui ont entrepris l'élaboration d'une stratégie de mise en œuvre nationale pourraient

apprécier l'information et la bibliographie qu'il contient quand ils analyseront les retombées des mesures envisagées sur l'environnement, la population et la santé. Le document fournit aussi d'autres précisions sur les avantages concomitants dont le Groupe d'analyse et de modélisation pourra se servir dans son projet de modélisation quantitative. Maintes lacunes sont mentionnées au fil des pages et les recherches à venir devraient tenter i) d'éclaircir les incertitudes relatives aux liens entre les questions atmosphériques et leurs incidences ou effets synergiques, antagonistes et cumulatifs; ii) d'évaluer les avantages, surtout pour les écosystèmes, l'environnement et le bien-être collectif; iii) de préciser les avantages indirects résultant des mesures qui réduiront les rejets de GES.

En essayant de combler ces lacunes dans nos connaissances, il importe de ne pas perdre de vue l'effet d'échelle et son importance lorsqu'on jaugera les avantages concomitants. En effet, les problèmes atmosphériques agissent à diverses échelles spatiales et temporelles, mais les plus immédiats, spécifiques aux régions, ont trait à la qualité de l'air. La même remarque s'applique aux avantages qui découlent des mesures de réduction des rejets de GES proprement dites. En outre, les scénarios de réduction des émissions envisagés aux États-Unis pourraient avoir des effets sensibles sur la santé en Ontario et dans l'Est du Canada, d'où l'importance des mesures binationales de réduction des émissions pour la diminution des rejets de GES et ses avantages concomitants.

Une démarche qualitative intégrée misant sur le savoir-faire des experts pour évaluer les avantages concomitants pourrait bien constituer la façon la plus pratique et la plus efficace d'éclaircir ces incertitudes et de combler nos lacunes. La deuxième phase du projet exigera une évaluation respectant les cinq aspects suivants :

- Elle devrait insister sur une estimation des incidences et des effets sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif, la santé humaine et les mesures de réduction des rejets de GES proprement dites, et attribuer une valeur relative à chaque avantage.

- Elle devrait estimer la série complète d'avantages concomitants résultant des mesures les plus probables qui seront adoptées dans le cadre de la stratégie de mise en œuvre nationale.

- Elle devrait analyser les autres possibilités relatives aux GES que proposeront les groupes de concertation d'après leurs avantages concomitants et ouvrir la voie à une analyse quantitative.

- Elle devrait s'effectuer simultanément à une échelle régionale centrée sur une agglomération urbaine, ce qui nous permettra de perfectionner la méthodologie et de tirer d'autres leçons importantes de l'exercice.

- Elle devrait placer l'évaluation régionale dans un contexte national et identifier les autres régions du Canada où des évaluations analogues devraient être entreprises.

Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec :

M. Quentin Chiotti
Pollution Probe
Téléphone : (416) 926-1907
Télécopieur : (416) 926-1601
Courriel : qchiotti@pollutionprobe.org

Natty Urquizo
Rainmakers Environmental Group
Téléphone : (416) 739-4902
Télécopieur : (416) 739-4221
Courriel : natty.urquizo@ec.gc.ca

POUR OBTENIR UN EXEMPLAIRE DU RAPPORT, VEUILLEZ COMMUNIQUER AVEC LES MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF

Don MacIver
Division de l'évaluation scientifique et de l'intégration des politiques
Service météorologique du Canada,
Environnement Canada
Téléphone : (416) 739-4391
Télécopieur : (416) 739-4882
Courriel : don.maciver@ec.gc.ca

Heather Auld
Service météorologique du Canada – Région de l'Ontario,
Environnement Canada
Téléphone : (416) 739-4258
Télécopieur : (416) 739-4721
Courriel : heather.auld@ec.gc.ca

Jay Barclay
Division de la gestion des questions atmosphériques mondiales
Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada
Téléphone : (819) 997-2141
Télécopieur : (819) 994-0549
Courriel : jay.barclay@ec.gc.ca

1.0 BUTS ET OBJECTIFS

Les changements climatiques qui se produisent à l'échelle mondiale constituent l'un des problèmes environnementaux les plus importants auxquels l'humanité fait face. Les scientifiques s'entendent généralement sur le fait que les gaz à effet de serre [p. ex., le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), l'ozone (O_3) et les halocarbures (HCFC, PFC et SF_6)] de sources anthropiques atteignent des concentrations atmosphériques qui exercent « une influence perceptible sur le climat mondial » (Houghton *et al.*, 1996, p. 4). Cette situation préoccupante a mené la communauté internationale à réagir au problème, d'abord avec la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques en 1992, suivie du Protocole de Kyoto, en 1997.

Ces interventions comprennent des politiques d'« atténuation » et d' « adaptation ». L'atténuation consiste en des mesures visant à diminuer les émissions anthropiques et, par conséquent, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, tandis que l'adaptation passe par des mesures destinées à réduire la vulnérabilité aux changements climatiques et l'incidence de ceux-ci. Il ne fait nul doute que la mise au point d'un ensemble efficace d'interventions d'atténuation et d'adaptation pose un énorme problème à tous les signataires du Protocole de Kyoto, et le Canada n'y fait pas exception. Par exemple, au cours de la réunion des 11 et 12 décembre 1997, les premiers ministres canadiens ont discuté du Protocole de Kyoto et se sont entendus, entre autres, sur le principe que l'élaboration d'une stratégie nationale de mise en œuvre efficace nécessite :

> **une compréhension approfondie de l'incidence, du coût et des avantages de la mise en œuvre du Protocole et des diverses options de mise en application s'offrant au Canada (Barclay, 1998a).**

Règle générale, la littérature scientifique et politique (Watson *et al.*, 1996) traite beaucoup plus d'atténuation – échange des droits d'émission, augmentation du stockage du carbone à l'aide de pièges et avantages connexes liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (qui reçoit une attention particulière en Amérique du Nord), – que d'adaptation. Une approche courante d'analyse des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre met l'accent sur leurs coûts et sur la possibilité de réduire la vitesse d'augmentation des concentrations atmosphériques par rapport au coût de l'incidence des changements climatiques, s'ils continuent comme prévu, sans une réduction efficace des émissions. On parle souvent de comparer le « coût de l'atténuation » au « coût de l'inaction ». Une telle comparaison, cependant, fournit un tableau incomplet de l'ampleur des conséquences que peuvent avoir les mesures de réduction sur le bien-être. Nombre de mesures qui visent à ralentir l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère procureront également une vaste gamme d'avantages connexes.

Les efforts consentis pour stopper la déforestation, par exemple, contribueront à la conservation de la diversité biologique mondiale, tandis que les réductions des émission de CO_2 atténueront d'autres problèmes environnementaux liés à l'usage de combustibles. La diminution des concentrations de polluants atmosphériques « classiques » améliorera la qualité de l'air à l'échelle locale et régionale, en plus d'avoir une incidence positive sur les efforts déployés pour réduire les répercussions connexes sur l'environnement et la santé humaine. Ne pas examiner adéquatement les avantages complémentaires ou les avantages connexes d'une telle politique pourrait avoir les conséquences suivantes :

i. évaluation incorrecte des « coûts nets » des politiques d'atténuation.
ii. détermination incorrecte des niveaux « sans regrets » de réduction des émissions de gaz à effet de serre;
iii. politique inutilement coûteuse en raison de son ineffi-cacité à exploiter pleinement les avantages connexes potentiels (Burtraw et Toman, 1997).

Bien que les estimations des avantages connexes découlant de la réduction des gaz à effet de serre varient grandement d'une étude à l'autre, il est généralement reconnu qu'ils peuvent être considérables, allant à plus de 30 % du coût par tonne de carbone non émis, sinon plus (Burtraw et Toman, 1997; Pearce *et al.*, 1996).

Le but du présent document est d'offrir une évaluation qualitative préliminaire de l'ampleur relative des effets sur l'environnement, la société et la santé des mesures prises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il énonce les grandes lignes des conséquences et des effets positifs et négatifs des réductions des émissions de gaz à effet de serre, lesquelles contribuent à appauvrir l'ozone stratosphérique

(et à augmenter le rayonnement UV-B) ainsi qu'à accroître les dépôts acides, le smog, les polluants atmosphériques dangereux et les particules en suspension. Les conséquences sur l'atmosphère et les écosystèmes (à la fois terrestres et aquatiques) sont examinées, de même que les effets sur l'environnement (agriculture et foresterie), le bien-être collectif et la santé humaine. Le document contient également un cadre d'évaluation qualitative des avantages connexes de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment la détermination des lacunes des connaissances, des zones d'incertitude et des priorités pour les analyses futures. Ces priorités comprennent l'élaboration d'un plan d'action pour la phase II, qui s'échelonne de mai à décembre 1999, lequel nous donnera un fondement scientifique pour évaluer les avantages connexes dans le cadre d'analyses à l'échelle nationale et régionale.

Le présent document décrit également la complémentarité de ces travaux et leurs liens avec d'autres évaluations analytiques (p. ex., modèles quantitatifs) et environnementales (p ex., liste des options destinée aux tables de concertation) actuellement en cours ou proposées dans le cadre de la stratégie nationale de mise en œuvre sur le changement climatique. Ensemble, ces activités visent à répondre à d'importantes questions d'analyses :

- Comment des mesures particulières de réduction des émissions de GES pourraient-elles modifier d'autres émissions dans l'environnement ou leur incidence?
- De quelle manière le fait de modifier les émissions de GES et d'autres substances à des sources particulières peut-il modifier les effets sur la santé humaine et sur la qualité de l'environnement?
- De quel ordre seraient les avantages quantifiables de la réduction de ces émissions ou de ces effets, par rapport aux coûts des mesures?
- Quelles autres répercussions convient-il de considérer, du moins sur le plan de la qualité, particulièrement celles qui ne sont pas directement attribuées aux améliorations de la qualité de l'air?
- Comment les mesures qui visent à réduire les autres émissions pourraient-elles influer sur les émissions de GES?
- Quelle est la stratégie la moins onéreuse pour atteindre de multiples objectifs en matière de qualité de l'air et de l'environnement (Barclay, 1998a)?

En outre, les travaux seront replacés dans le cadre général de la littérature qui traite des avantages de la réduction des émissions des polluants atmosphériques. Ces travaux comprennent la détermination des domaines dans lesquels le « poids de la preuve » dans la littérature appuie la quantification de répercussions et d'effets particuliers (outre ceux déjà retenus pour quantification). En dernier lieu, les résultats figurant dans le présent document fournissent de l'information sur laquelle les tables de concertation peuvent s'appuyer pour évaluer l'incidence des options sur l'environnement et la santé, en plus de permettre au *Groupe de l'analyse et de la modélisation* (GAM) de déterminer les exigences relatives à la poursuite des travaux et de participer à la synthèse.

2.0 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET POLITIQUE

Le changement climatique est un problème environnemental mondial. Il n'en demeure pas moins que les coûts et les avantages associés aux « actions » et à « l'inaction » sont différenciés sur les plans temporel et spatial, distribués inégalement entre les pays, les régions et les générations. C'est pourquoi l'élaboration d'une stratégie d'intervention efficace face aux changements climatiques constitue un enjeu énorme pour les décideurs. Si l'on veut évaluer les avantages connexes de la réduction des émissions de GES, il convient tout d'abord de définir le contexte scientifique et politique de l'incidence des changements climatiques, de même que les avantages associés aux mesures d'atténuation.

Dans le dernier cas, l'évaluation doit porter non seulement sur les GES qui contribuent aux changements climatiques, mais également sur les autres polluants atmosphériques et autres problèmes atmosphériques. De nombreuses incertitudes demeurent quant à ces problèmes, qu'il s'agisse de polluants atmosphériques précis, des liens entre ceux-ci et les problèmes atmosphériques et, plus particulièrement, de l'interaction entre les polluants. Étant donné que la documentation sur les changements climatiques et la complexité de l'atmosphère est vaste, le présent rapport tente de mettre en lumière les grandes questions scientifiques et politiques qui s'y rattachent. Le rapport examine également l'importance des préoccupations temporelles et spatiales et leur incidence sur l'évaluation des avantages connexes associés à la réduction des émissions de GES.

2.1 Incidences des changements climatiques

Différents modèles de circulation générale (MCG) appliqués au climat de la Terre indiquent que, dans un scénario de doublement des concentrations actuelles de CO_2, la température moyenne annuelle de surface montera de 1 à 3,5 °C d'ici 2100, soit une vitesse moyenne de réchauffement supérieure à ce qui est jamais survenu dans les 10 000 dernières années (Houghton *et al.*, 1996). On prévoit que ce sont les régions du Nord qui subiront le plus important changement de température, le réchauffement moyen étant plus important sur les terres que sur les océans et en hiver qu'en été. Même si les niveaux de confiance ont tendance à être supérieurs pour les projections aux échelles de l'hémisphère ou du continent, comparativement aux prévisions régionales, il existe un consensus général sur l'orientation que prendront les changements des températures et des précipitations au Canada ainsi que sur leur répartition régionale grossière sur le pays (Maxwell *et al.*, 1997).

On prévoit que les changements climatiques varieront d'un endroit à l'autre du Canada, le réchauffement étant plus prononcé dans l'intérieur que près des côtes, et, en hiver, plus marqué dans l'Arctique que dans le sud du pays. Le réchauffement moyen net du centre et du nord du Canada pourrait atteindre entre 4 et 6 °C d'ici 2050, et se limiter entre 3 et 4 °C le long de ses côtes est et ouest. Il est fort possible que ces hausses de température doublent d'ici la fin du prochain siècle, représentant ainsi un réchauffement de près de trois fois la moyenne mondiale. Même si on a moins confiance dans les scénarios hydrologiques que dans ceux sur la température, on prévoit que les précipitations et l'humidité du sol moyennes augmenteront au cours de l'hiver, mais avec une baisse nette de l'humidité du sol et des ressources en eau de plus de 20 % dans l'intérieur du pays au cours de l'été. Il s'ensuivrait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. On pourrait voir aussi une augmentation des inondations dans de nombreuses régions côtières de même qu'une fonte importante du pergélisol et des icebergs dans le Nord.

Il y a de grandes incertitudes quant à la variabilité et à l'intensité des changements climatiques, ce qui complique l'évaluation de l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur les événements extrêmes. Néanmoins, on croit qu'un faible changement dans le climat moyen ou dans la variabilité du climat provoquerait des changements relativement importants sur la fréquence des événements extrêmes. Au Canada, il est probable que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur et des orages convectifs augmentent au cours de l'été, accroissant ainsi la possibilité de sécheresses. En hiver, les vagues de froid seraient moins prononcées en raison du réchauffement des températures, mais la fréquence des tempêtes hivernales et tempêtes de verglas intenses pourrait augmenter. Même si les événements extrêmes sont difficiles à prévoir, il est clair qu'il s'est produit une augmentation radicale des versements d'assurance associés à ces événements extrêmes, à la fois à l'échelle mondiale et à l'échelle nationale (Munich Re.,1997) (Brun, 1997).

Entre 1984 et 1994, plus de 1 milliard de dollars ont été versés par l'industrie canadienne de l'assurance pour com-

penser les pertes occasionnées par les désastres climatiques naturels (p. ex., les réclamations liées à des épisodes de grêle, d'inondations, d'orages, de tornades et de tempêtes de vent). Ce total est antérieur à de nombreux phénomènes climatiques extrêmes qui se sont produits ces dernières années. Mentionnons entre autres les inondations dans la région du Saguenay, en juillet 1996, et celles du sud du Manitoba, en avril et mai 1997, de même que les chutes de neige record sur les basses terres continentales de la Colombie-Britannique, entre le 22 décembre 1996 et le 3 janvier 1997. On a enregistré des quantités record de pluie verglaçante l'est de l'Ontario, le sud du Québec et du Nouveau-Brunswick, entre le 4 et le 10 janvier 1998, et de neige sur Toronto et le sud de l'Ontario en janvier 1999. Il n'est donc pas surprenant que l'on s'inquiète de plus en plus que des événements extrêmes puissent toucher les systèmes naturel et humain du Canada au point de représenter un risque plus élevé que les changements des conditions climatiques moyennes qui les provoquent (Maxwell *et al.*, 1997; Dotto, 1999).

On s'attend à ce que les changements climatiques prévus aient un vaste éventail de conséquences et d'effets négatifs sur les systèmes naturel et humain de tout le Canada. L'étendue de ces effets négatifs, sur le plan de leur portée régionale et sectorielle, est bien illustrée par une évaluation récente d'Environnement Canada sur l'incidence du changement et de la variabilité climatiques, et sur l'adaptation à ceux-ci (Maxwell *et al.*, 1997). La première phase de l'Étude pancanadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques couvre six régions, douze secteurs et huit questions intersectorielles. Même si l'étude représente un effort monumental pour évaluer l'état actuel des connaissances, il subsiste de nombreuses lacune qui limitent notre compréhension de la portée et de l'étendue des impacts du changement climatique sur les secteurs et régions du pays.

Selon notre capacité à nous adapter, les conséquences seront probablement plus importantes dans des secteurs comme l'environnement naturel, les ressources en eau et la santé humaine. Il y aura une combinaison d'effets nuisibles et d'occasions dans des secteurs tributaires des ressources naturelles et sensibles au climat, comme l'agriculture, les pêches et la foresterie. Les conséquences seront moindres pour les secteurs de l'économie qui sont plus industrialisés et moins tributaires du climat, comme le transport, la production d'énergie et la construction. Cependant, dans le cas de ces derniers secteurs et dans certains domaines où des possibilités existent (p. ex., l'expansion de l'agriculture vers le nord, la réduction de la demande en énergie avec des hivers plus cléments, etc.), il demeure un risque de conséquences majeures causées par les phénomènes extrêmes. De plus, il est possible que le Canada subisse les conséquences indirectes d'impacts touchant d'autres pays. Et ces conséquences indirectes pourraient être tout aussi importantes, voire plus, que les conséquences directes. Il est aussi possible que des effets néfastes ressentis ailleurs (p. ex., des marchés nouveaux ou plus grands pour l'énergie produite par le Canada ou pour l'exportation de produits agricoles et forestiers) soient profitables pour le Canada.

Cependant, selon les connaissances actuelles, il ne semble pas y avoir d'ensemble unique de conséquences de plus grande importance, que ce soit à l'échelle sectorielle ou à l'échelle régionale. Étant donné que la richesse et les degrés de vulnérabilité sont distribués inégalement entre et dans les régions et secteurs, les régions les plus pauvres et les plus sensibles seront probablement davantage touchées en raison de leur moindre capacité à s'adapter. Les régions qui seront probablement les plus touchées sont les suivantes (pas nécessairement dans cet ordre).

- Les régions côtières des Maritimes, particulièrement les terres basses exposées à l'élévation du niveau de la mer. Cette région ne profitera probablement pas des avantages du réchauffement (au cours des dernières décennies, on a même constaté un refroidissement), et des changements rapides dans les stocks de poissons pourraient également survenir.

- Les parties les plus pauvres des provinces des Prairies, particulièrement les régions qui dépendent en grande partie de l'agriculture, surtout en Saskatchewan. Ces régions pourraient cependant profiter de certains avantages compensatoires, comme des saisons de croissance plus longues et des hivers plus cléments, ainsi que l'apparition de nouveaux marchés d'exportation, mais la menace de sécheresses plus sévères, de nouvelles infestations de ravageurs et de nouvelles maladies des végétaux semble maintenant devoir dépasser les avantages en question.

- Les régions de l'Arctique, particulièrement celles où

vivent les populations et les communautés autochtones du Nord, où l'incidence des changements climatiques sera probablement la plus prononcée et où les communautés relativement plus pauvres vivent de manière traditionnelle et tirent leur subsistance de la pêche et de la chasse. Certaines communautés plus modernisées du Nord seront cependant moins touchées, voire pas du tout, par les changements climatiques.

- Les régions urbaines, où l'on s'attend à ce que l'incidence des changements climatiques et d'autres problèmes atmosphériques sur la santé humaine soit importante (Chiotti, 1999a).

Alors que la littérature qui traite de l'incidence et des mesures d'adaptation est considérable, il n'y a eu que peu de recherches sur les coûts entraînés par les changements climatiques, particulièrement dans le cas du Canada. Généralement, on distingue trois catégories de coûts liés à l'incidence des changements climatiques :

i. les coûts liés à l'inaction (appelés fréquemment coûts d'inaction);
ii. les coûts des mesures, autonomes ou régies par des politiques, d'adaptation aux changements climatiques qui ne sont pas évités par les mesures d'atténuation;
iii. les coûts des impacts résiduels qui demeureront malgré l'adaptation.

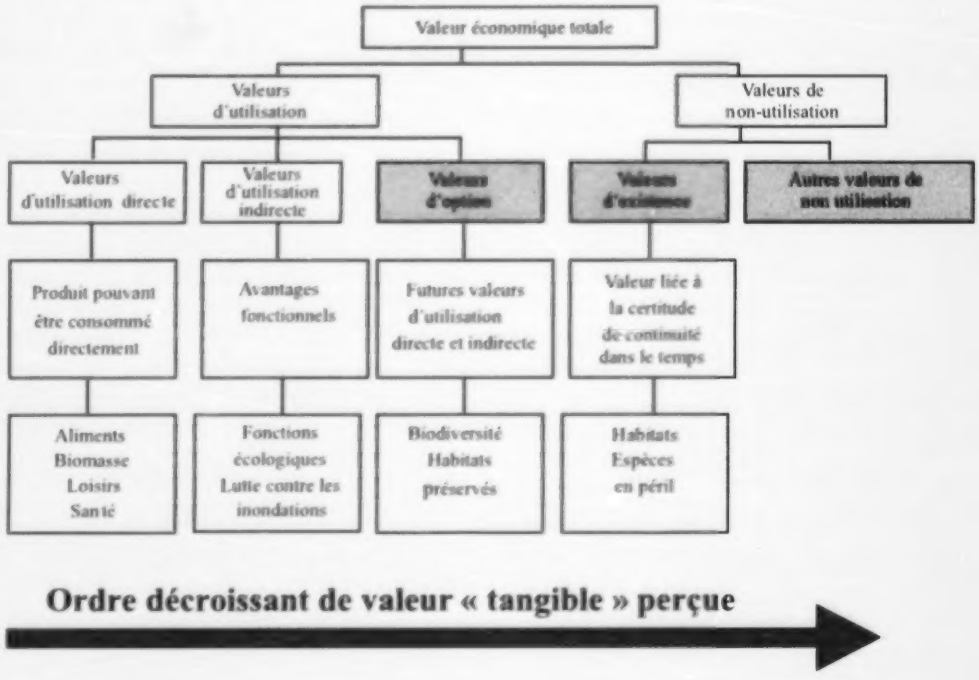
Les études qui tentent de compiler des évaluations du coût total des changements climatiques (Ayres et Jorg, 1991; Fankhauser, 1994; Nordhaus, 1994) prévoient que, dans les pays en développement, les coûts s'élèveront entre 1 et 1,5 % du produit national brut (PNB) actuel. Dans les pays moins développés, les coûts projetés représentent un pourcentage beaucoup plus élevé du PNB. Pour le Canada, Tol (1995) évalue à 1,5 % la réduction du PNB (fondé sur l'année 1998), soit un coût de 8 à 12 milliards de dollars pour l'économie canadienne.

Cependant, ces évaluations doivent être regardées avec une extrême prudence, en raison des nombreuses limites liées au hypothèses et techniques méthodologiques utilisées pour le calcul (Pearce *et al.*, 1996). Par exemple, elles ne reflètent pas les coûts issus de la non-linéarité, car les risques de changements climatiques n'entraînent pas des résultats prévisibles et graduels, mais plutôt des conséquences relativement brusques, imprévisibles et potentiellement catastrophiques (Administration Economic Analysis, 1998). Les risques incalculables liés aux scénarios catastrophiques coûteux, la possibilité de conséquences imprévues, les coûts de l'adaptation aux changements climatiques et la valeur sociale de la plupart des biens et des services non marchands ne sont qu'un exemple des coûts laissés de côté ou sous-évalués dans les évaluations canadiennes (Maxwell *et al.*, 1997).

En ce qui concerne les biens et services non marchands, il pèse de plus en plus d'incertitude sur la valeur des éléments environnementaux non utilisés (fig. 2.1). Ceci est particulièrement le cas pour la valeur des écosystèmes naturels que Costanza *et al.* (1997) évaluent, sur une base mondiale, à plus de 33 billions de dollars US annuellement, soit deux fois le produit national brut mondial. Il n'est pas surprenant que les évaluations actuelles pour le Canada puissent être substantiellement plus élevées si des biens non économiques, tels que la famille, la communauté, la religion et les écosystèmes, pouvaient être évalués (Rothman *et al.*, 1998). Même une simple réévaluation des coûts aux États-Unis, qui prend en considération les variations dans et entre les évaluations élevées et faibles pour chacun des secteurs étudiés, produit un éventail plus bas ou plus élevé d'un ordre de grandeur (Demeritt et Rothman, 1998). Ainsi, les coûts annuels de l'incidence des changements climatiques au Canada pourraient atteindre entre 3,5 et 24,5 milliards de dollars.

On a un peu plus de confiance dans l'évaluation des mesures d'adaptation, du moins pour celles prises face au climat actuel. En se fondant sur une combinaison de documents publiés et d'opinions d'experts pour le début de la présente décennie, Herbert et Burton (1995) évaluent à plus de 11,6 milliards de dollars le coût de l'adaptation au climat actuel. À l'aube du nouveau millénaire, les coûts d'adaptation au climat actuel seront probablement beaucoup plus élevés, et ils pourraient continuer d'augmenter avec les changements climatiques. mesures d'adaptation efficaces pour réduire la vulnérabilité (réduisant du même coup les effets néfastes) pourraient également nous donner l'avantage d'être bien placés pour profiter de nouvelles occasions qui pourraient découler des changements climatiques. Cependant, certains effets des changements climatiques seront inévitables, et ce, malgré les mesures d'adaptation mises en œuvre.

Figure 2.1 : Catégories de valeurs économiques attribuées aux ressources naturelles



Source : Rothman et al., 1998

2.2 Réaction aux changements climatiques

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques détermine deux types de réactions à la menace que constituent les changements climatiques, soit i) l'atténuation et ii) l'adaptation. On a estimé que les émissions mondiales de gaz à effet de serre devront être réduites de plus de 50 % au cours du prochain siècle, pour stabiliser les concentrations atmosphériques (CGCP, 1997). Ainsi, même si le Protocole de Kyoto est un premier pas important vers des réductions notables, des réductions supplémentaires seront nécessaires dans l'avenir, et la participation d'un plus grand nombre de pays sera requise si l'on veut stabiliser un jour les concentrations. Aux termes du Protocole de Kyoto, le Canada s'est donné pour but de ramener ses émissions à 6 % sous les niveaux de 1990 d'ici les années 2008-2012, et devra peut-être envisager des niveaux encore plus bas dans l'avenir. comme il contribue pour environ 2,1 % aux émissions mondiales de GES, il est fort peu probable qu'une action unilatérale du Canada réduise les changements climatiques de façon significative. Le Canada pourrait donc devoir agir à l'échelle mondiale en demandant aux autres pays de prendre des mesures ou d'accroître le rôle de l'adaptation dans sa stratégie d'intervention nationale (où les avantages peuvent se faire sentir au niveau local). Il importe également de reconnaître que les mesures d'atténuation peuvent elles-mêmes engendrer un vaste éventail d'avantages qui s'accumulent de façon plus positive sur les plans temporel et spatial.

Les avantages associés à l'atténuation peuvent être évalués de deux façons. Premièrement, la réduction des émissions en deçà des projections de base amènera une diminution des dommages qui se seraient produits en cas

d'inaction. Ces dommages évités, souvent nommés « avantages de réduction », se font sentir à l'échelle mondiale, et on s'attend à ce qu'ils augmentent avec le temps, produisant ainsi plus d'avantages dans l'avenir que présentement (Pearce *et al.*, 1996). Deuxièmement, il existe des avantages liés à la réduction des émissions de GES qui profitent aux autres secteurs, plus particulièrement par l'amélioration des puits de carbone et par la prise de mesures pour réduire les émissions de GES. En outre, les mesures mises de l'avant pour réduire les émissions de GES, qui peuvent également contribuer à réduire les émissions d'autres polluants environnementaux « classiques », reçoivent de plus en plus d'attention depuis la rencontre de Kyoto.

Même s'il est possible d'atteindre des réductions importantes des émissions de GES non liées à l'énergie grâce aux progrès technologiques (CHEMinfo Services Inc. et Margaree Consultants Inc., 1998), la méthode la plus rentable, avec les technologies actuelles, pour réduire les émissions de GES liées à l'énergie est de réduire la consommation de combustibles fossiles : conservation de l'énergie, efficacité énergétique, pratiques agricoles et remplacement des hydrocarbures. La réduction de la consommation des combustibles fossiles réduira également un bon nombre de polluants, dont le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les particules, l'ozone troposphérique (O_3), les composés organiques volatils (COV), les métaux lourds (p. ex., le plomb et le mercure) et d'autres polluants toxiques (p. ex., l'acétaldéhyde, le formaldéhyde, les composés organiques aromatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les furanes et les dioxines chlorées) (Pearce *et al.*, 1996; CGCP, 1997; Administration Economic Analysis, 1998).

Ces polluants sont également des précurseurs d'autres problèmes atmosphériques, comme l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique (et l'augmentation du rayonnement UV-B), les dépôts acides, le smog et les polluants atmosphériques dangereux, tous reconnus pour causer une vaste gamme d'effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, ainsi que sur la santé environnementale, sociale et humaine. Le SO_2 et les NO_X sont des précurseurs des dépôts acides, qui ont des impacts sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. Le SO_2 et l'O_3 peuvent causer des dommages foliaires aux cultures et aux arbres, O_3 provoquant une réduction des rendements agricoles. Les matières particulaires et les polluants secondaires comme les sulfates et les nitrates sont particulièrement dangereux pour la santé humaine puisqu'ils affectent les appareils respiratoire et cardiovasculaire. On sait également que les polluants nuisent à la visibilité et causent des dommages aux matériaux, accélérant la détérioration des infrastructures (routes et ponts), des édifices, des statues et des monuments. L'étendue de ces effets (donc l'étendue des avantages) est fonction, entre autres, de l'importance et de la durée de l'exposition à des polluants particuliers et de la sensibilité de la population exposée. Les avantages de mesures de réduction des émissions de GES seront ainsi ressentis à court terme et, surtout dans les régions où les mesures d'atténuation sont mises en œuvre.

En plus d'améliorer la qualité de l'air des régions et de réduire l'incidence et les effets néfastes des autres problèmes atmosphériques, les mesures elles-mêmes pourraient également avoir des avantages « externes » additionnels. Des modifications des habitudes de transport (réduction de l'utilisation de véhicules par une seule personne au profit du transport public ou du covoiturage, par exemple), pourraient contribuer à réduire les accidents ou les embouteillages, et la diminution de la consommation d'essence réduirait les risques d'accidents de navires-citernes et de déversements de pétrole (Pearce *et al.*, 1996). L'évitement peut avoir d'autres avantages. Il existe déjà de nombreuses politiques qui visent des polluants et des problèmes atmosphériques particuliers exigeant le recours à des solutions technologiques (et donc à des investissements) pour réduire les émissions. Si on réussit à réduire les rejets d'autres polluants atmosphériques en réduisant les émissions de GES, le contrôle des émissions sera inutile, et les coûts du contrôle de la pollution, qui peuvent être élevés, seront évités. On estime ces coûts à environ 1 milliard de dollars annuellement pour les États-Unis (Administration Economic Analysis, 1998).

2.3 Intégration des problèmes atmosphériques

De manière générale et pour de nombreux pays, la réaction aux problèmes atmosphériques au moyen de politiques a jusqu'à maintenant adopté une approche cloisonnée, réglant les problèmes au cas par cas. Le Canada ne fait pas exception à cet égard, puisqu'il s'est doté d'un ensemble de politiques séparées, agissant à différentes échelles d'analyse (mondiale, binationale, nationale et régionale) pour s'attaquer aux pro-

blèmes de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (le Protocole de Montréal), des pluies acides et de l'ozone troposphérique (Accord Canada-États-Unis sur la qualité de l'air), etc. Les évaluations des effets associés aux problèmes atmosphériques tendent également à se concentrer sur un thème particulier, comme les pluies acides (Environnement Canada, 1997a) et l'ozone troposphérique (Dann et Summers, 1997), bien, que dans certains cas, une approche plus intégrée ait été utilisée (OCAC, 1997; TAETG, 1997).

Ces dernières années, on a de plus en plus pris conscience que les questions scientifiques et les politiques associées aux problèmes atmosphériques doivent être abordées de façon intégrative (Munn, 1995). Les arguments en faveur de l'intégration ont été élaborés au niveau conceptuel (Munn et Maarouf, 1997; Maarouf et Smith, 1997; Munn 1997), le changement climatique étant considéré comme un facteur clé agissant sur d'autres problèmes atmosphériques. Une évaluation des problèmes atmosphériques et de la biodiversité (Munn, 1996) constitue la première tentative initiale d'intégration appliquée, mais d'autres travaux doivent être entrepris avant que cette approche ne soit considérée comme la norme plutôt que l'exception. Une initiative menée par Environnement Canada pour évaluer les changements atmosphériques dans la région Toronto-Niagara (Ogilvie *et al.*, 1997; Chiotti, 1999b; Mills et Craig, 1999) pousse plus loin l'intégration, abordant les problèmes atmosphériques multiples sur les plans tant des émissions que des impacts (de même que sur le plan des mesures à la fois d'atténuation et d'adaptation).

Par définition, une évaluation de l'incidence et des effets des avantages connexes de la réduction des émissions de GES nécessite d'adopter une approche intégrative qui prenne en considération les interactions entre les problèmes atmosphériques et les interactions dans les impacts et les effets. On trouve quelques études à ce sujet dans la littérature (Alfsen *et al.*, 1992; Barker, 1993; Complainville et Martins, 1994; Scheraga et Leary, 1994; Burtraw et Toman, 1997). Dans un contexte canadien, les analyses des avantages connexes sont rares, sinon au mieux exploratoires (Haites, 1996). On trouve plus d'études sur les avantages connexes de la réduction des émissions de gaz autres que les GES, c'est-à-dire les avantages résultant de la réduction des émissions de SO_2 ou de NO_x, ou d'études axées sur des sources particulières de polluants atmosphériques ou des mesures de réduction des émissions (p. ex., le transport). Il peut manquer beaucoup d'éléments dans la littérature en ce qui concerne les avantages connexes, mais nombre de documents peuvent être utilisés pour faire une évaluation par extrapolation.

L'évaluation des incidences et des effets des avantages connexes est une tâche imposante, mais elle est essentielle sur les plans de la science et des politiques, étant donné la nature intégrative du problème. MacIver et Urquizo (1999) ont bien illustré la nature dynamique des changements atmosphériques au Canada, l'interaction entre les problèmes atmosphériques, la complexité des dimensions spatiales et temporelles et l'importance de prendre en compte la totalité de l'atmosphère, dans une optique de politique intégrée. Dans le même ordre d'idées, les impacts et les effets des polluants autres que les GES sur les écosystèmes et la santé environnementale, sociale et humaine sont comparativement dynamiques. Sans aucun doute, certaines mesures prises en vue de réduire les émissions de GES auront un effet de synergie, tandis que d'autres auront un effet antagoniste, s'ils n'aboutissent pas à un résultat non linéaire.

Le cas du soufre est un bon exemple de complexité, sur les plans à la fois scientifique et politique. Pearce *et al.*, (1996) notent que l'utilisation d'un épurateur-laveur pour réduire les rejets de soufre pourrait mener à une diminution de l'efficacité du système et, par conséquent, à une augmentation des émissions de CO_2. Les mesures prises pour réduire ainsi les dépôts acides pourraient en fait augmenter les concentration de GES dans l'atmosphère. Dans le même ordre d'idées, on sait maintenant que l'accumulation d'aérosols soufrés dans l'atmosphère diminue la température moyenne, ce qui masque l'ampleur du réchauffement de la planète. Par contre, des températures plus élevées aggravent la pollution atmosphérique photochimique, dont le SO_2 est un élément. La complexité de ces interactions met en évidence le besoin d'une compréhension claire de la participation de la science et des politiques dans la résolution des problèmes atmosphériques multiples, mais la possibilité de résultats synergiques, antagonistes et non-linéaires demeure tout au long du processus inhérent aux avantages connexes. Burtraw et Toman (1997) citent de nombreux exemples de tels résultats, dont les suivants.

- L'utilisation de la biomasse au lieu du charbon pour produire de l'électricité pourrait augmenter les émissions

de matières particulaires, si les équipements de contrôle et de régulation ne sont pas adéquats.

- Une augmentation de l'efficacité énergétique par une meilleure isolation des maisons pourrait augmenter la pollution à l'intérieur de celles-ci, ainsi que l'exposition au radon.

- L'utilisation accrue du gaz naturel au lieu du charbon soulève le problème des émissions fugitives de méthane, puisque ce dernier est un plus puissant gaz à effet de serre que le CO_2.

Même si la détermination de mesures efficaces de réduction des émissions de GES dans le contexte plus vaste des avantages connexes est une tâche ardue, l'« inaction » des décideurs canadiens face à la réduction des émissions de GES ou d'autres polluants n'est pas une option viable. Les changements climatiques aggraveront certaines conditions au Canada, ce qui justifie de réduire les émissions d'autres polluants, même à l'aide de mesures autres que celles visant les GES. Ainsi, avec les changements climatiques :

- on s'attend à une augmentation de l'intensité, la gravité et la fréquence des épisodes de smog, particulièrement dans les grandes régions urbaines;

- on s'attend à une augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère, ce qui affectera la croissance des plantes C_4 et particulièrement des plantes C_3 en raison de l'enrichissement en CO_2.

Dans ces deux exemples, ne pas réduire les émissions d'autres polluants atmosphériques pourrait aggraver les effets néfastes sur la qualité de l'air de la région et limiter les effets bénéfiques de l'enrichissement en CO_2. Dans le cas de la pollution atmosphérique, les changements climatiques pourraient engendrer des coûts additionnels de l'ordre de 3,5 à 27,2 milliards de dollars US pour la santé humaine aux États-Unis (Pearce *et al.*, 1996).

Le Protocole de Kyoto représente donc une excellente occasion de prendre en compte la totalité de l'atmosphère et des impacts sur la santé environnementale et humaine dans une perspective intégrant la science et les politiques, et ce, en prenant des mesures de réduction des émissions de GES. Il ne faudrait cependant pas y voir la possibilité de ne pas adopter une approche intégrative pour tous les polluants, problèmes atmosphériques et leurs impacts. Le Canada se signale depuis longtemps par ses rapports sur l'état de l'environnement (Environnement Canada, 1996), mais d'autres pays sont allés encore plus loin dans l'intégration des problèmes atmosphériques aux évaluations environnementales (Stanners et Bourdeau, 1995). Les « bilans environnementaux » élaborés par l'Institut national de la santé publique et de l'environnement des Pays-Bas pourraient être le meilleur exemple d'intégration de la science et des politiques (RIVM, 1999).

Comme Pearce *et al.*, (1996) le notent, la question des avantages secondaires tirés de la réduction des émissions de carbone devrait être séparée de la question plus globale de l'ensemble optimal de mesures de réduction visant tous les polluants. Avec le Protocole de Kyoto, la cause est régie par la prépondérance implicite du problème de l'effet de serre, les avantages connexes étant vus comme des effets secondaires heureux, plutôt que d'être considérés en tant que tels. Ce n'est pas nécessairement la meilleure façon de procéder, et peut-être chaque polluant (et problème atmosphérique) devrait-il être évalué (et ses émissions réduites) à la lumière des dommages environnementaux qu'il cause.

Le point clé n'est donc plus de se demander si l'état actuel de la science fournit une assise solide pour agir rapidement et prudemment en vue d'atténuer les changements climatiques (Administrative Economic Analysis, 1998), mais plutôt quelles mesures vont donner « le meilleur rendement de notre investissement ». Même si la réponse à cette question pour le Canada est le thème du présent document, Pearce *et al.*, (1996) fournissent une certaine orientation générale. Les interdépendances, tout comme l'emplacement, ont leur importance, et les mesures de réduction des émissions de GES devraient être concentrées là ou les avantages conjoints de la réduction de toutes les émissions sont les plus élevés.

3.0 ÉLABORATION D'UN CADRE ANALYTIQUE

La présente section vise à fournir un contexte analytique pour évaluer l'importance relative des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES. Cette discussion concerne avant tout une brève revue de la littérature traitant directement de la question des avantages connexes ; on y identifie les résultats clés, les lacunes des connaissances et les incertitudes, qui caractérisent les évaluations de cette question. Vient ensuite un aperçu général de la réaction et des activités en matière de recherches actuellement élaborées pour le GAM et les tables de concertation. On y présente un court survol de l'exercice de modélisation quantitative en cours de développement, y compris le rôle de l'évaluation environnementale stratégique, les lignes directrices de l'évaluation des effets qu'ont sur la santé et l'environnement les mesures relatives aux changements climatiques, ainsi que le besoin d'un document synthèse pour étudier la question des avantages connexes dans une perspective intégrée.

On présente, à la dernière section, un cadre analytique qui tente d'intégrer les liens complexes qui existent entre les polluants et les problèmes atmosphériques, ainsi que leurs incidences sur les écosystèmes. Ce cadre étudie plus en profondeur les effets potentiels (avantages connexes) de la réduction des émissions de GES sur plusieurs aspects de la santé environnementale (agriculture et foresterie), sociale et humaine, y compris les effets pouvant résulter des mesures mêmes de réduction des émissions. Dans le dernier cas, il faudra évaluer les avantages et les coûts qui ne sont pas liés directement aux émissions et à la qualité de l'air, comme les avantages indirects du cyclisme et de la marche (et de l'augmentation de l'exercice physique) sur la santé humaine.

Pour élaborer le cadre de recherche, on a examiné à fond la littérature scientifique pour identifier, de manière à la fois qualitative et quantitative, les incidences et les effets qui peuvent se présenter comme des avantages connexes de la réduction des émissions de GES. Le cadre, de même que les discussions qui le suivent (sections 4, 5 et 6), constituent la base de données de nos connaissances actuelles et, en tant que tel, peuvent être utiles pour déterminer les lacunes de la recherche et des connaissances sur des voies de dommages potentiellement importantes qui ont été sous-estimées dans les précédentes évaluations des avantages connexes.

3.1 Revue de la littérature

La littérature traitant directement de la question des avantages connexes de la réduction des émissions de GES se compose d'en un nombre restreint mais croissant d'études (Pearce *et al.*, 1996; Burtraw et Toman, 1997). Les effets sur la santé humaine évités sont le plus important sujet d'intérêt (Lee Davis *et al.*, 1997), bien que la plupart des études tentent de traiter d'une plus vaste gamme d'avantages connexes, avec cependant différents degrés de portée et de profondeur. Une approche est couramment adoptée pour examiner les avantages connexes, la plupart des études incluant quatre étapes d'analyse fondamentales :

- évaluation des changements dans les conditions atmosphériques entre les scénarios avec et sans mesures de limitation (réduction des émissions.) ;
- évaluation des populations humaines et autres exposées aux changements de conditions atmosphériques ;
- application d'un ensemble d'équations concentration-réaction qui traduisent les changements des conditions atmosphériques en effets sur la santé humaine et environnementale des populations touchées ;
- élaboration d'estimations de la valeur des dommages évités.

Les études des réductions des émissions de GES laissent entendre que les avantages connexes peuvent être importants, mais les évaluations varient considérablement dans la littérature, notamment en raison des incertitudes et des limites liées aux données évaluées ainsi que des différences dans les hypothèses et dans les méthodes utilisées. Les écarts sont importants, même si les méthodes et techniques adoptées dans les études sur les avantages connexes ont été largement utilisées ailleurs dans la littérature et que, dans la plupart des cas, elles ont fait l'objet d'un examen minutieux de la part de pairs. Habituellement, les variations dans les évaluations peuvent être attribuées à des différences concernant :

- les polluants atmosphériques visés et la combinaison de sources d'énergies étudiées;
- les renseignements de base sur la qualité de l'air ambiant et les tendances des émissions de polluants;

- les types de mesures de réduction des émissions adoptées et le rôle de la technologie;
- la mesure dans laquelle l'étendue du transport atmosphérique des émissions est prise en compte;
- la couverture des incidences et des effets;
- les méthodes d'évaluation utilisées.

Les écarts dans les éléments ci-dessus peuvent peut engendrer de grandes variations dans les évaluations des avantages connexes, rendant la comparaison entre pays (et, dans certains cas, entre régions) difficile. De plus, les aspects spatiaux peuvent se révéler extrêmement importants pour évaluer les incidences et les effets. Les régions et pays produisant de l'électricité à partir du charbon, par exemple, rejetteront beaucoup plus de polluants atmosphériques qui nuisent à la qualité de l'air régionale que les régions où l'hydroélectricité domine. Dans le même ordre d'idées, les régions rurales où la densité de la population est faible pourraient profiter d'avantages connexes moindres que les régions urbaines densément peuplées. De plus, la valeur des effets sur la santé humaine pourrait également varier, selon la méthode utilisée pour évaluer les coûts. La prise en considération de la volonté de payer (VDP) dans l'évaluation des coûts peut produire des résultats très différents de la prise en considération du consentement à accepter une compensation (CAC). Le choix des taux d'actualisation peut également influer grandement sur la valeur des évaluations. Ces points ne sont que certains des choix et des problèmes méthodologiques qui contribuent à la présence d'un vaste éventail d'évaluations des avantages connexes.

Même si une explication plus poussée de ces différences peut être trouvée ailleurs dans la littérature (Pearce *et al.*, 1996; CGCP, 1998; Administration Economic Analysis, 1998; Abt, 1998), l'examen entrepris par Burtraw et Toman (1997) de neuf études importantes menées aux États-Unis est particulièrement utile, puisqu'il illustre également la manière dont les études peuvent être très sélectives dans l'évaluation de la valeur totale des avantages connexes. Les études américaines ont porté presque exclusivement sur le thème de la qualité de l'air et une série précise de polluants « critères », principalement le SO_2, les NO_X, les COV, le CO ainsi que les particules en suspension totales, polluants qui sont produits par le cycle de génération de l'électricité à partir de combustibles (en particulier les émissions des centrales au charbon). Les dommages pour la santé humaine évités sont généralement le thème principal de l'analyse, bien que, dans certains cas, la valeur sociale de la visibilité résidentielle et récréative ait également été prise en considération. Le choix de cet éventail relativement restreint (polluants critères et effets sur la santé humaine) s'appuie sur le fait que l'on estime que les États-Unis profiteront d'une large part des avantages accessoires (Burtraw et Toman, 1997, p. 1). On croit que, de manière collective, les réductions des concentrations de polluants critères comptent pour environ 90 à 96 % des dommages évitables dans toutes les voies environnementales.

Les domaines laissés de côté ou sous-estimés comprennent les incidences et les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, des dépôts acides et des polluants atmosphériques dangereux. De plus, on omet fréquemment les émissions provenant des sources de transport, les impacts sur les écosystèmes, les effets sur la santé humaine de l'ozone et de particules secondaires de moins de 2,5 microns ($PM_{2,5}$) comme les sulfates et les nitrates, et les effets sur les ressources en eau, l'agriculture, la foresterie et d'autres éléments environnementaux de valeur intrinsèque. Les avantages accessoires non quantifiés associés aux émissions pourraient être importants, comme l'indique le document réponse du président des états-Unis au Protocole de Kyoto (tableau 3.1). Les polluants atmosphériques toxiques ne sont que rarement inclus dans les évaluations des avantages connexes, même si les stratégies d'atténuation des émissions de GES amèneront une réduction additionnelle des concentrations d'autres substances capables d'avoir divers effets sur la santé et l'environnement, comme les métaux lourds, l'acétaldéhyde, le formaldéhyde, les composés organiques aromatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les furanes et dioxines chlorées (Administration Economic Analysis, 1998).

L'application de fonctions dose-réponse pour évaluer les effets des stress atmosphériques sur les écosystèmes aménagés, en particulier sur l'agriculture, est contestée dans la littérature. Austin *et al.* (1998) notent que, même si l'ozone de l'air ambiant peut être le polluant atmosphérique affectant le plus les cultures, les études qui examinent ces effets ne prennent pas adéquatement en considération la réaction comportementale. Le rôle efficace de l'adaptation pour

réduire les effets néfastes des changements climatiques (sinon permettre aux agriculteurs de tirer profit des possibilités offertes par les changements climatiques) a été bien documenté (Easterling *et al.*, 1993; Smit, 1993; Rosenzweig et Parry, 1994); il semble donc que des mesures d'adaptation efficaces aux autres stress atmosphériques pourraient également être envisageables.

Tableau 3.1 Avantages accessoires non quantifiés des réductions des émissions

Catégorie d'effet	Effets	Autres effets possibles
Santé humaine	Mortalité par cancer. Effets non-cancérigènes : - neurologiques; - respiratoires; - reproducteurs; - hématopoiétiques; - développementaux; - immunologiques; - toxicité des organes.	
Écologiques	Faune. Plantes. Écosystèmes. Diversité biologique.	Perte d'habitats pour les espèces en péril
Bien-être collectif	baisses dans les occasions de loisirs, le rendement agricole, la visibilité	Perte de la diversité biologique, détérioration des immeubles

Source: adapté de Administration Economic Analysis (1998)

Les estimations des impacts de la réduction des émissions de GES sur l'atmosphère sont habituellement exprimées en pourcentages ou en mesure par tonne métrique d'émissions de carbone réduites. Complainville et Martins (1994) estiment que des réductions des concentrations de CO_2 à 4 à 21 % sous les niveaux de référence de 1990 entraîneront des réductions équivalentes des SO_X et des NO_X (4 à 29 %, et 3 à 32 % respectivement). Scheraga et Leary (1994) présentent une estimation un peu moindre pour les États-Unis, où une réduction de 8,6 % pour le CO_2 au moyen de l'application d'une taxe sur le carbone entraînerait les réductions suivantes pour d'autres polluants : SO_X (1,9 %), NO_X (6,6 %), CO (1,5 %), particules en suspension totales (1,8 %) et COV (1,4 %).

Les estimations de la réduction des émissions de GES peuvent aussi être grandement tributaires des hypothèses adoptées. Dans bon nombre d'études américaines, par exemple, les estimations des émissions de SO_2 dues à des réductions des GES sont largement fonction des réductions que devraient permettre d'autres mesures de politiques, comme le Titre IV de la Clean Air Act de 1990 (Burtraw et Toman, 1997). Les estimations de la réduction des émissions peuvent également être influencées par les hypothèses concernant les taux des émissions. Il peut y avoir des différences importantes dans les estimations des réductions des émissions selon les hypothèses posées pour les taux et les sources d'émission, qui varient souvent entre les régions. Les mesures de réduction des émissions de GES provenant de sources stationnaires comme les centrales au charbon ou l'industrie lourde peuvent produire des niveaux considérablement plus élevés de réduction des émissions de SO_2 (réduction de 20 kg par 1000 kg de carbone), comparativement aux sources mobiles (réduction de 0,5 kg par 1000 kg de carbone) comme les voitures et les camions à moteur diesel (IUCC, 1993).

Même s'il ne semble y avoir eu qu'une amélioration relativement faible du côté des émissions de polluants liés aux GES, il est important de noter que la moindre diminution peut permettre d'éviter des dommages entre dix et plusieurs centaines de fois plus importants que ceux associés au CO_2 (CGCP, 1998). Dans leur examen des études traitant des avantages connexes pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Pearce *et al.* (1996) ont découvert que la valeur des dommages évités se situe entre 2 et 500 $US par tonne de carbone de moins. En moyenne, la valeur des avantages connexes compense 30 % des coûts initiaux de la réduction des GES, bien que, dans certains cas, les économies puissent être beaucoup plus élevées (Burtraw et Toman, 1997; Pearce *et al.*, 1996). On estime que les avantages connexes pourraient compenser entre 30 et 50 % des coûts de réduction initiaux en Norvège (Alfsen *et al.*, 1992) et plus de 100 % au Royaume-Uni (Barker, 1993) et au Japon (Amano, 1994).

Les estimations pour le Canada sont relativement rares, de portée limitée et brèves au mieux, même si elles corroborent clairement l'hypothèse que des niveaux similaires d'avantages connexes peuvent également être atteints. Le Groupe de travail sur les prévisions du Comité de coordination national sur les problèmes atmosphériques a élaboré des

estimations de la réduction des émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles qui résulteraient des différents ensembles de mesures de réduction des émissions de GES. Ils ont évalué que, pour chaque réduction de 1000 tonnes d'émissions de CO_2 au Canada, il y aurait une réduction correspondante des émissions de SO_2 se situant entre 0,85 et 1,30 tonne, des émissions de NO_X se situant entre 0,75 et 1,55 tonne et des émissions de COV se situant entre 0,40 et 1,40 tonne (Groupe de travail sur les prévisions, 1995). Une autre étude du CGCP donne une plage beaucoup plus large, laissant entendre qu'il est possible d'obtenir des réductions se situant entre 0,4 et 14,5 tonnes pour le SO_2, entre 1,3 et 6,6 tonnes pour les NO_X et entre 4,4 et 0,2 tonnes pour les COV (Haites, 1996).

Les simulations effectuées à l'aide de modèles pour le plan de gestion des gaz à effet de serre de 1995 du Climate Action Network laissent entrevoir une réduction des émissions de CO_2 de 147 MT d'ici 2010 (environ 6,5 % sous les niveaux de 1990), des émissions de SO_2 de 376 kilotonnes (24 %), de NO_x de 281 kilotonnes (16 %) et de COV de 135 kilotonnes (13 %) (Comeau, 1998). Les estimations provenant de cette étude suggèrent qu'une réduction des émissions de GES comparable à celles de l'engagement pris par le Canada aux termes du Protocole de Kyoto ne réduirait que peu les émissions des autres polluants, du moins par rapport aux niveaux qui seraient requis pour atteindre les objectifs de qualité de l'air. Ces résultats suggèrent également qu'il pourrait être difficile d'atteindre les différents objectifs avec des mesures visant un seul problème à la fois (Barclay, 1998b).

Aucune de ces études ne tentait d'appliquer les fonctions dose-réponse pour déterminer les impacts sur les écosystèmes ou les effets sur la santé environnementale, sociale ou humaine. Les avantages connexes qui peuvent résulter de la réduction des émissions de GES n'ont donc pas été évalués dans ces études. Il s'agit là d'une assez grave lacune dans notre compréhension des avantages connexes au Canada, qui complique les analyses économiques des stratégies de réduction des émissions de GES (Haites, 1996). Le traitement des options de réduction des émissions des GES est lui aussi variable, soulignant une autre importante lacune des connaissances. Même si ces études illustrent que la réduction des émissions des GES est grandement fonction des mesures choisies, les mesures pratiques et abordables qu'elles proposent pourraient en fait sous-estimer les niveaux de réduction possibles. Par exemple, dans les mesures pour réduire les émissions de GES proposées par Comeau (1998) et par Hornung *et al.* (1998), on ne trouve aucune tentative de remplacement des centrales au charbon de l'Ontario par des centrales à combustibles fossiles plus propres et produisant moins de carbone (p. ex., le gaz naturel) ou de déplacement de quantités importantes d'essence pour le transport. Dans le dernier cas, une plus grande utilisation du transport en commun pourrait amener de plus importantes réductions des émissions des GES, particulièrement dans la région métropolitaine de Toronto (Roberts, 1998). La mise en œuvre de telles mesures permettrait fort probablement de plus importantes réductions des émissions liées aux combustibles et amènerait de plus grands avantages qu'un ensemble de mesures moins exigeantes (Barclay, 1998b).

3.2 Réaction en matière de recherche

Comme il importe de bien connaître les avantages connexes associés à la réduction des émissions de GES et qu'il faut combler les importantes lacunes des connaissances sur la situation canadienne, trois activités d'analyse sont actuellement en cours ou proposées dans le cadre de la stratégie nationale sur les changements climatiques. Même si aucune de ces activités ne peut elle-même fournir toutes les réponses quant aux incertitudes entourant les avantages connexes, les renseignements qu'elles fournissent collectivement pourraient être supérieurs à la somme de leur apport individuel.

Ces activités sont :

(i) réalisation d'un travail de modélisation quantitative pour évaluer la valeur des avantages connexes de la réduction des émissions de GES, faisant intervenir la coopération et la collaboration de différents ministères fédéraux;

(ii) élaboration d'un ensemble de lignes directrices fournies par le GAM pour aider les tables de concertation à élaborer et analyser les mesures possibles;

(iii) préparation d'un document fournissant une évaluation scientifique des connaissances actuelles, décrivant une méthode d'évaluation cadre des avantages connexes découlant des mesures de réduction des émissions de GES et définissant les activités de recherche futures complémentaires à celles énumérées plus haut.

[1] Un passage au gaz naturel peut entraîner une légère hausse des émissions de COV

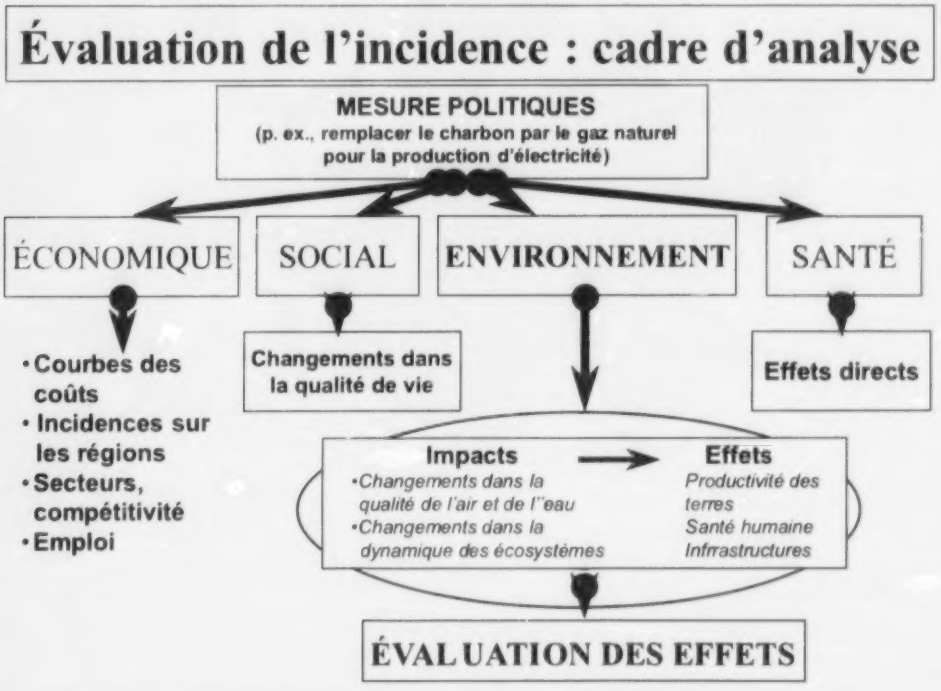
Collectivement, ces activités appuieront davantage les tables de concertation dans leurs efforts pour déterminer, évaluer et recommander des mesures efficaces de réduction des émissions de GES.

Modélisation quantitative

L'exercice de modélisation quantitative nécessite un ensemble étagé de cinq activités distinctes, mais interreliées (figure 3.1), en commençant par l'élaboration d'une base de données exhaustive sur les émissions et cumulant les évaluations de la valeur des effets évités sur la santé et l'environnement. Les activités de modélisation comprennent les éléments suivants :

- intégration de l'inventaire des émissions des GES au système national de base de données de l'inventaire des émissions de polluants atmosphériques critères (RDISH), utilisé par Environnement Canada pour contrôler les polluants atmosphériques critères, l'ammoniac, certains métaux lourds et les polluants organiques persistants;
- élargissement du modèle et de la base de données AERCoSt pour inclure les stratégies de réduction des émissions de GES et les évaluations quantitatives des incidences de polluants différents associés à ces stratégies;
- incorporation des réductions futures des émissions de GES et des réductions des concentrations de polluants atmosphériques critères au modèle prévisionnel des émissions (MPÉ) d'Environnement Canada;
- modification du modèle unifié de la qualité de l'air afin de quantifier l'incidence sur la qualité de l'air aux échelles locale et régionale des mesures choisies pour le Plan national de mise en œuvre de mesures sur le changement climatique;
- évaluation des avantages de la réduction des concentrations de polluants atmosphériques classiques produite par les initiatives de réduction des émissions de GES au moyen du modèle d'établissement de la valeur de la qualité de l'air (AQVM) (Barclay, 1998a).

À la dernière étape, les paramètres mesurés du modèle AQVM sont surtout les effets sur la santé humaine, même si les estimations non liées à la santé peuvent comprendre les



dommages causés aux cultures, aux matériaux, à la visibilité et à la pêche récréative, ainsi que la salissure des matériaux.

Évaluations environnementales stratégiques

De nombreuses méthodes d'évaluation peuvent être utilisées par les décideurs pour déterminer si des mesures individuelles doivent continuer d'être appliquées comme prévu, comme entreprendre des évaluations des impacts sur l'environnement, sur la société et sur la santé. Lorsqu'on l'applique plus largement pour évaluer les politiques, les plans et les programmes proposés, le processus est appelé « évaluation environnementale stratégique » (EES). Le but principal de l'EES est :

> d'intégrer systématiquement les considérations environnementales dans les processus de planification et de prise de décision du gouvernement relatif aux politiques, aux plans et aux programmes proposés (Hazell et Benevides, 1998; p. 350).

L'EES offre, pour évaluer les incidences et les effets cumulatifs de nombreux projets individuels, les liens avec d'autres politiques et les questions de durabilité, une approche plus exhaustive que les évaluations fondées sur le projet. Au cours des dernières années, l'EES a bénéficié d'une acceptation croissante et même d'un statut légal dans de nombreux pays, dont le Danemark, Hong Kong, la Norvège, l'Australie et le Royaume-Uni (BMA, 1998). Au Canada, on n'a pas accordé de statut légal à l'EES, cependant, elle a été utilisée efficacement pour évaluer les politiques agricoles (Hazell et Benevides, 1998). Shillington *et al.* (1997) estiment que l'EES est un outil utile pour aider les décideurs à aborder le changement planétaire, le développement durable et le changement climatique en particulier.

Même si aucune EES des mesures d'atténuation n'a été entreprise, on a demandé aux tables de concertation de mener une évaluation préparatoire des avantages connexes pouvant découler des options de politiques proposées. L'approche consistera en un examen environnemental sommaire de toutes les politiques possibles et en une évaluation plus poussée des effets environnementaux potentiels associés aux politiques élaborées plus en détails et proposées dans les Rapports sur les options des tables de concertation. Les points à évaluer comprennent les impacts sur les environnements atmosphérique, aquatique et terrestre et les effets de ces changements environnementaux sur les conditions sociales et sur la santé humaine (tableau 3.2).

Tableau 3.2 Questions environnementales clés proposées dans le guide du GAM pour l'évaluation des mesures relatives au changement climatique

Environnement atmosphérique :
1. changements des caractéristiques de l'atmosphère;
2. changements de la qualité de l'air résultant des émissions de sources ponctuelles et non ponctuelles;
3. changements des régimes de pollution atmosphérique à longue distance.

Environnement aquatique :
1. changements de la qualité et/ou de la quantité des eaux de surface;
2. changements de la qualité et/ou de la quantité des eaux souterraines;
3. changements de la qualité des océans;
4. changements dans les écosystèmes/ la biodiversité aquatiques.

Environnement terrestre :
1. changements de la qualité et/ou la quantité des sols;
2. changements de la foresterie;
3. changements dans les écosystèmes/ la biodiversité terrestres;
4. changements des régimes et pratiques d'utilisation des terres.

Conditions de santé sociale et humaine :
1. changements de la perception de la qualité de vie ou du bien-être collectif des populations et des communautés;
2. changements des risques pour la santé humaine;
3. changements des revenus ou du statut social;
4. effets sur les valeurs culturelles;
5. changements de la population et de sa répartition;
6. changements des conditions de travail;
7. changements des habitudes récréatives;
8. effets sur les ressources culturelles ou patrimoniales;
9. changements de l'esthétique.

Source: Barclay, 1998b.

Document sur l'état actuel des connaissances

La troisième activité d'analyse consiste à préparer un document résumant, sous la forme d'une évaluation quantitative, l'état actuel de nos connaissances sur la question des avantages connexes. Cette activité comporte une évaluation préliminaire de l'importance relative des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES. Les incidences sont les changements touchant les polluants qui contribuent aux problèmes atmosphériques autres que le changement climatique, en plus des changements dans les écosystèmes aquatiques et terrestres. Les effets sont les dommages évités

pour la santé environnementale (agriculture et foresterie), sociale et humaine, y compris les avantages connexes pouvant résulter des mesures de réduction des émissions de GES. Dans le dernier cas, on inclut une évaluation des avantages non liés aux émissions. On présente également une façon de procéder, qui propose l'établissement d'un groupe d'experts scientifiques et la réalisation d'une évaluation des avantages connexes aux échelles nationale et régionale fondée sur les avis d'experts.

Étant donné l'énormité du problème et l'importance de la littérature sur le sujet, le présent document ne sera pas une évaluation exhaustive des incidences et des effets, mais plutôt un survol des processus, interactions et incertitudes complexes qui caractérisent la question. Néanmoins, certains des renseignements découverts au cours de cet exercice peuvent être utiles dans l'initiative de modélisation quantitative. Le document peut être utilisé comme « bibliothèque » de référence par les tables de concertation pour évaluer les mesures proposées en fonction des avantages découlant des réductions des émissions de GES. Il permet également d'illustrer l'énorme tâche que représente l'évaluation des avantages connexes d'un point de vue intégratif, et les processus complexes en jeu. Il souligne aussi le besoin de reconnaître le vaste éventail des avantages possibles, dont bon nombre n'ont jamais été abordés dans la littérature sur les avantages connexes.

L'examen de la littérature a porté sur quatre groupes d'études :

i. les études qui évaluent directement les avantages connexes;

ii. les évaluations environnementales de questions ou polluants atmosphériques particuliers menées sans prendre en compte les changements climatiques;

iii. les analyses qui prennent en considération les incidences et les effets des problèmes atmosphériques multiples;

iv. les études qui traitent de facteurs externes liés aux avantages et aux coûts des mesures et qui sont non directement attribuables aux émissions de GES.

En l'absence d'une étude définitive traitant directement des avantages connexes au Canada ou ailleurs, l'élargissement de la recherche documentaire nous a donné un aperçu des incidences et des effets, y compris les coûts, associés aux problèmes atmosphériques autres que les changements climatiques. Selon d'autres évaluations environnementales, les avantages de la réduction des émissions de polluants atmosphériques critères pourront être déterminés et transposés à la réduction des émissions de GES. De plus, il pourrait être possible de déterminer des seuils ou des charges critiques qui pourraient se révéler importants pour tirer des avantages significatifs de la réduction des émissions.

Dans ce document, on identifie les zones d'incertitude et les grandes lacunes des connaissance, mais il est important de noter que toute évaluation quantitative des incidences et des effets qui serait fondée uniquement sur un examen de la littérature serait également entachée d'incertitude. Les études examinées ont été tirées d'une littérature importante et comportent des analyses des avantages de la réduction des émissions dans plusieurs pays et régions, dont bon nombre présentent des conditions atmosphériques, environnementales et démographiques très différentes du Canada. La transposition des données n'est donc pas sans risques, et on doit faire les comparaisons avec prudence. Au mieux, on peut déterminer l'importance relative des incidences et des effets évités à l'aide de cet exercice plutôt que d'une série d'évaluations qui reflètent de manière plus exacte les avantages pour le Canada. Une évaluation plus intégrée et plus exhaustive nécessite de recueillir le point de vue de nombreux scientifiques possédant de l'expertise dans les domaines de l'atmosphère, des écosystèmes, de l'environnement, du bien-être collectif et de la santé humaine.

Cadre d'évaluation des avantages connexes

En élaborant un cadre pour évaluer l'importance relative des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES, il faut commencer par élargir l'approche de base adoptée dans d'autres recherches sur les avantages connexes pour y inclure un éventail de polluants et de problèmes atmosphériques plus vaste que ce qu'on peut trouver ailleurs dans la littérature. Le cadre d'évaluation (figure 3.2) et la discussion qui le suit (sections 4, 5 et 6) mettent en évidence qu'il est important d'élargir notre compréhension des avantages connexes, en particulier d'un point de vue intégratif. Il faudra donc élargir la gamme des polluants étudiés au-delà des polluants critères ou classiques, et inclure les métaux lourds et toxiques dans l'évaluation. Bon nombre de ces polluants ont déjà fait l'objet d'études scientifiques approfondies, qui ont mené à l'élaboration d'une vaste série de politiques mises en œuvre à différentes échelles spatiales pour régle-

menter les émissions. Le succès ou l'échec de ces politiques visant à réduire les concentrations d'autres polluants atmosphériques aura une incidence sur les avantages connexes qui découleront de la réduction des émissions de GES; il est donc essentiel de situer le Protocole de Kyoto dans ce cadre de politiques élargi.

Les incidences des émissions sur la totalité de l'atmosphère sont prises en considération dans ce cadre d'évaluation, y compris toute rétroaction ou lien synergique qui pourrait se produire. Les incidences concernent les écosystèmes tant aquatiques que terrestres, et les effets (zones ombrées de la figure 3.2) s'étendent au-delà de la santé humaine et visent de manière plus approfondie les avantages pour l'environnement et le bien-être collectif. Pour ce qui est de l'environnement, on prend en considération à la fois les effets sur l'agriculture et sur la foresterie.

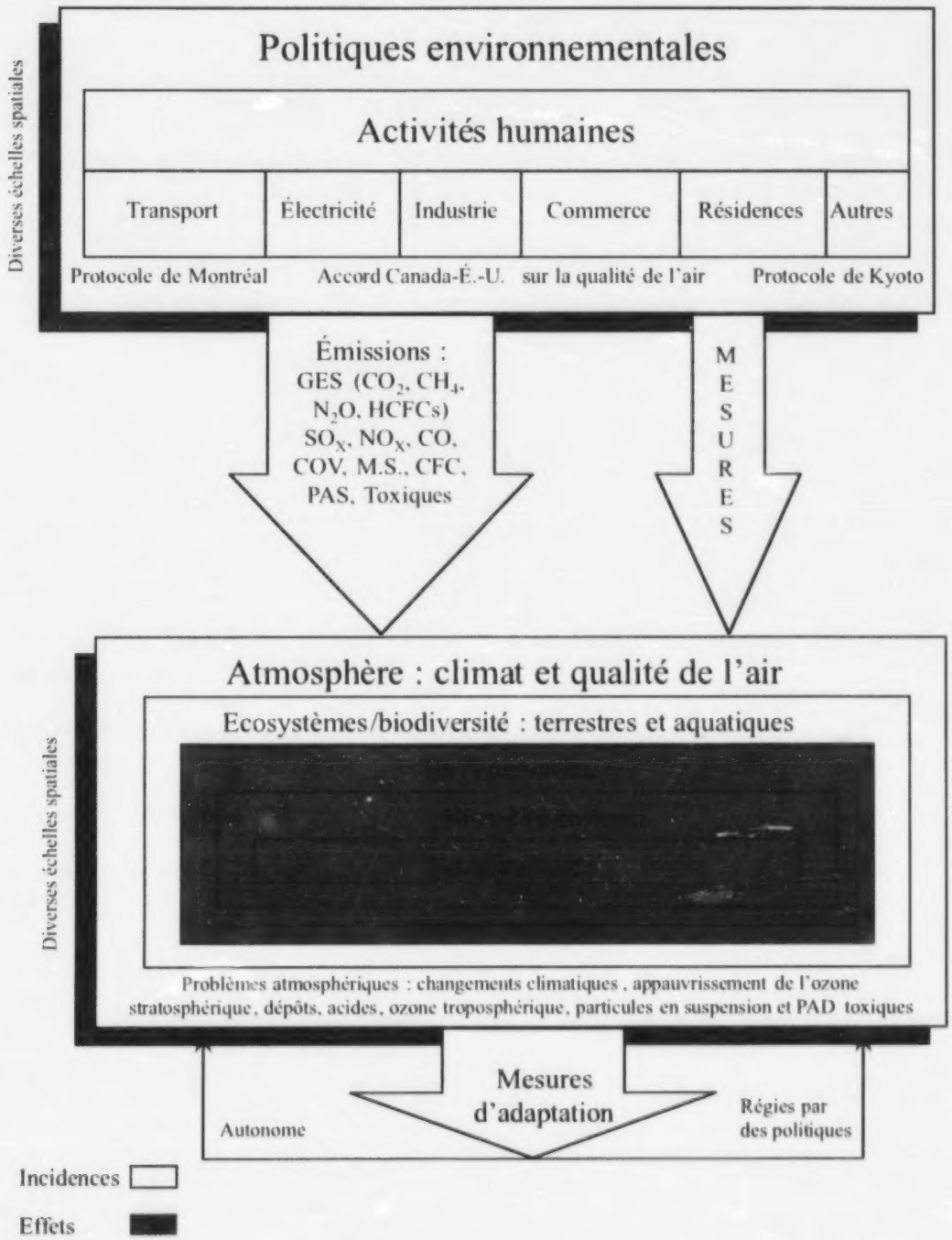
L'aspect peut-être le plus important de l'élaboration d'un cadre d'évaluation plus vaste est celui des interrelations entre les polluants et les problèmes atmosphériques, et les incidences et effets qui en résultent. En prenant en considération les stress multiples, on constate qu'il est possible que les résultats soient additifs, synergiques, voire antagonistes. Les systèmes naturels et humains sont complexes, et généralement non linéaires (Hansell *et al.*, 1997), en particulier lorsque les stress atmosphériques sont en cause. Les processus atmosphériques doivent être pris en considération, en particulier l'influence des mécanismes de transport, des réactions chimiques et des facteurs météorologiques sur les polluants et problèmes atmosphériques. Certains phénomènes atmosphériques comme le rayonnement UV-B et l'ozone troposphérique peuvent, combinés, affecter les écosystèmes ou l'agriculture bien plus que la somme de leurs actions individuelles. Il en va de même pour l'effet de la combinaison de l'ozone troposphérique et des particules (PM2,5) sur la santé humaine.

La prise en considération des incidences et des effets des mesures de réduction des émissions de GES exige également d'étudier une importante quantité de documents qui traitent d'une grande variété de facteurs externes liés à la combustion des combustibles fossiles. Habituellement, ces facteurs externes touchent ceux qui ne sont pas visés par un projet ou une activité. Même si la littérature prend en considération les incidences et les effets de la qualité de l'air et des changements climatiques en tant que facteurs externes dans les évaluations environnementales des activités humaines, dans le cadre d'évaluation des avantages connexes, les facteurs externes ne sont pas directement liés aux émissions, à la qualité de l'air et aux autres problèmes atmosphériques. Selon le type d'activité humaine, les facteurs externes comprennent une vaste gamme de répercussions et d'effets. Les changements de mode de transport (des véhicules à moteurs aux bicyclettes) peuvent améliorer la santé humaine grâce à l'augmentation de l'exercice, alors que l'électricité produite au moyen de sources ne produisant pas d'émissions de GES (p. ex., l'hydroélectricité, l'énergie nucléaire et la production d'électricité solaire) ont des incidences et des effets sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine. Une grande partie de la littérature à ce sujet a été laissée de côté dans les évaluations des avantages connexes, même si les études des coûts et des avantages associés au transport (Greene *et al.*, 1997; Bein, 1997) et à l'électricité (Ottinger *et al.*, 1991) indiquent que les effets externes peuvent être à la fois généralisés et substantiels.

À la complexité de l'évaluation des facteurs externes s'ajoute un corpus documentaire axé sur « l'évaluation sur le cycle de vie ». Même s'il s'agit d'une discipline relativement jeune, dont la méthodologie doit être raffinée, l'évaluation sur le cycle de vie est un outil efficace qui gagne en popularité dans l'ouest de l'Europe (Gielen *et al.*, 1998). Elle peut être utilisée pour évaluer les effets potentiels du cycle de vie d'un produit ou service sur l'environnement mondial (BMA, 1998). Cette démarche prend en considération à la fois les intrants (énergie et matériaux) et les extrants (rejets vers la terre, l'air et l'eau) d'un système, aux étapes de la production des matériaux, de l'assemblage du produit, de son utilisation du produit et de la gestion des déchets.

Sans aucun doute, une évaluation des facteurs externes non liés aux problèmes atmosphériques demande un examen plus approfondi que ne le permet le présent document sur l'état actuel des connaissances. Cependant, pour illustrer les types de facteurs externes qui pourraient intervenir et la complexité de réagir aux incidences et aux effets externes des mesures de réduction des émissions de GES, on se sert de facteurs externes associés à l'électricité, au transport et à l'efficacité énergétique.

Figure 3.2 Cadre d'évaluation des avantages connexes



4.0 INCIDENCE DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET LES ÉCOSYSTÈMES

Comme on l'a mentionné plus haut, les émissions de gaz à effet de serre (GES), en particulier celles produites par les combustibles fossiles, sont étroitement liées à celles d'autres polluants atmosphériques comme O_3, CO, SO_2, NO_2, PM_{10}, $PM_{2,5}$, les sulfates, les métaux lourds, les composés organiques complexes et les matières radioactives. Au Canada, l'utilisation des combustibles fossiles compte pour environ 55 % des émissions de SO_2, 90 % des émissions de NO_X, 55 % des émissions de composés organiques volatils (COV) et 90 % des émissions de monoxyde de carbone (SOE, 1996). La réduction des émissions de GES obtenue par la diminution de l'utilisation de combustibles fossiles réduira également les concentrations de ces polluants.

Les concentrations de GES, leurs tendances dans l'atmosphère, sources et puits sont résumés au tableau 4.1. À l'exception du CO et du méthylchloroforme, l'abondance de ces gaz traces est à la hausse. La tendance est importante, mais le temps de séjour l'est aussi. Plus le composé est stable, plus longtemps il demeure dans l'atmosphère, comme c'est le cas du CF_4 dont le temps de séjour est de 50 000 ans.

Pour évaluer les avantages de la réduction des émissions de GES sur la qualité de l'air, nous devons d'abord évaluer dans quelle mesure le Canada atteint tous ses autres objectifs en matière de qualité de l'air, puisque les problèmes atmosphériques se chevauchent de manières complexes. La complexité des interactions entre les problèmes atmosphériques est traitée de manière approfondie dans le document de MacIver et Urquizo (1999). On trouvera ci-dessous une brève explication de la façon dont les problèmes atmosphériques interagissent de manière synergique et complexe. On insistera sur l'impact de chaque polluant et sur l'effet qu'aura sur eux la réduction des émissions de GES.

La limitation des émissions de gaz à effet de serre devrait avoir une incidence nette et visible sur les éléments suivants :

- particules;
- ozone troposphérique;
- pluies acides touchant les écosystèmes aquatiques et forestiers;
- polluants toxiques;
- niveaux de rayonnement UV-B;
- monoxyde de carbone.

Il est important de noter que les avantages ne sont pas indiqués de manière quantitative, mais qualitative. Aucune valeur monétaire n'est attribuée aux avantages.

4.1 Engagements officiels

Réduction des émissions de dioxyde de soufre

L'Accord sur la qualité de l'air entre les États-Unis et le Canada a porté fruit et a établi un important précédent en matière de coopération internationale sur les problèmes atmosphériques. Aux termes de cette entente, la réduction des émissions de SO_2 a été établie à 40 % sous les niveaux de 1980, objectif qui a été dépassé de 18 % par le Canada et de 23 % par les États-Unis. Néanmoins, les dommages subis par les écosystèmes sensibles nécessitent de nouveaux objectifs de réduction pour l'après-2000. Le Groupe de travail sur les émissions acidifiantes du Canada a demandé une réduction de 75 % des émissions de SO_2 au-delà des engagements actuels (Gouvernement du Canada, 1998a). Actuellement, les deux pays n'ont accepté qu'un objectif de réduction des émissions de SO_2 de 50 % sous les niveaux de 1997 pour 2010 (Gouvernement du Canada, 1998a).

Réduction des émissions d'oxydes d'azote

D'ici 2010, les émissions de NO_X devraient être tombées à 10 % sous les niveaux de 1990 au Canada, et ce, essentiellement en raison des améliorations dans le secteur du transport. Les États-Unis prennent également des mesures pour réduire les émissions de NOx (sources mobiles et fixes) afin de diminuer les pluies acides et l'ozone troposphérique. Dans le cadre du Programme de lutte contre les pluies acides, un certain nombre d'unités de service public américaines ont atteint une surconformité de 16 % pour les taux d'émission obligatoires pour 1997 (Gouvernement du Canada, 1998a).

Réductions des concentrations d'ozone troposphérique

La phase II du Plan fédéral de gestion du smog prévoit des mesures correctives pour l'ozone troposphérique et les particules. La phase I fixe le niveau d'ozone troposphérique à 82 ppb sur une heure. Cet objectif n'assure pas une protection adéquate de la santé humaine, animale ou végétale.

Tableau 4.1. Résumé des principaux gaz traces dont les émissions à la surface augmentent.

Gaz	Nom commun	Concentrations à la surface	Tendance annuelle dans l'atmosphère	Temps de séjour dans l'atmosphère (an)	Puits	Principales sources anthropiques
CO_2	Dioxyde de carbone	358 ppmv	0,4 % 1,5 ppmv/an	50-200[1]	Plantes, surface de l'océan, atmosphère	Combustion des combustibles fossiles, préservation de l'utilisation des terres
CH_4	Méthane	1 720 ppbv	10 ppbv/an 0,6 %/an	~ 9	OH, radicaux HO_2, absorption par les sols, augmentation dans l'atmosphère	Animaux domestiques, rizières, combustion de biomasse, fuites de gaz et dans les mines, milieux humides, termites, océans, eau douce, hydrate de CH_4.
CO	Monoxyde de carbone	35-220 ppbv	- 6,1 à 11 % (2 ppb/an)	~ 2 mois	OH	Combustion des combustibles fossiles, agriculture (oxydation du méthane et d'hydrocarbures non méthaniques), combustion de biomasse
N_2O	Hémioxyde d'azote	312 ppbv	0,8 ppbv/an	120	Absorption par les sols, photolyse dans la stratosphère, augmentation dans l'atmosphère	Combustion des combustibles fossiles, combustion de biomasse
NO_x ($NO+NO_2$)	Oxydes d'azote impairs réactifs	10-200 pptv	Inconnue	Jours		Industrie chimique
$CFCl_3$	CFC-11	268 pptv	Stable	50 - 55	Photodisso-ciation dans la moyenne à haute stratosphère	Industrie chimique
CF_2Cl_2	CFC-12	500 pptv	Se stabilise	116	Id.	Industrie chimique
$C_2Cl_3F_3$	CFC-113	82 pptv	Stable	~ 90	Id.	Industrie chimique
CH_3CCl_3	Méthylchlorofor me	160 pptv	-14 ppt (-2,2 %)	4,8 – 5,1	Photolyse, réaction avec O (^1D), et destruction par la foudre	Industrie chimique
HCFC	Hydrochlorofluo ro-carbures	10 pptv	1,67 %		Id.	Substitut de CFC dans l'industrie chimique
HCFC-22	Substitut de CFC	110 pptv	5 pptv/an (5 %/an)	12	OH, eau de mer	Industrie de la réfrigération
CF_4	Un perfluocarbure	72 pptv	1,2 pptv/an (2 %/an)	50 000	Inconnus	Industrie chimique
CF_2CLBr	Ha-1211	2,5 pptv	0,1 pptv/an (3 %/an)	20		Extincteurs
CF_3Br	Ha-1301	2,0 pptv	0,3 pptv/an (8 %/an)	65-77		Agriculture, combustion de biomasse, sources industrielles, émissions de moteurs à essence
SO_2	Dioxyde de soufre	10-200 pptv	Inconnue	~0,02	OH	Combustion des charbons et des pétroles
COS	Sulfure de carbonyle	500 pptv	<3	2 - 2,5		Combustion de biomasse et de combustibles

Sources : Krupa et Keckert (1989); Prinn (1994); Environnement Canada (1998); Houghton et al. (1996); Prinn et al. (1995); Dlugokencky et al. (1998); Novelli et al. (1998)

[1] Aucune durée de vie ne peut être définie en raison des divers taux d'absorption des différents processus puits.

Les problèmes de l'ozone troposphérique et des particules doivent être étudiés en tant que partie intégrée d'un programme de gestion de la qualité de l'air. La phase II vise des réductions des émissions de l'ordre de 47 kt de NO_X et 183 kt de COV d'ici 2010 (Gouvernement du Canada, 1997). Ces chiffres sont certes très bas, mais ce plan jette les bases d'un accord international avec les États-Unis.

Le Plan d'action conjoint pour contrer la pollution atmosphérique transfrontalière, élaboré en 1997, met l'accent sur l'ozone troposphérique et les particules. Ce plan d'action reconnaît que les sources américaines contribuent pour 50 à 60 % à l'ozone mesuré dans le sud-ouest de l'Ontario les jours sans nuage (Environnement Canada, 1996). Les objectifs du Canada en matière d'ozone troposphérique et de particules font l'objet d'un examen. Le Conseil canadien des ministres de l'environnement a récemment décidé de gérer les deux substances par la mise en vigueur de standards pancanadiens (SPC) plutôt que d'objectifs nationaux afférents à la qualité de l'air ambiant. L'on s'attend à ce que les SPC soient annoncés à l'automne 1999.

Actuellement, il n'existe aucun objectif national pour les PM_{10} ni pour les $PM_{2,5}$. Le Groupe de travail fédéral-provincial recommande des concentrations de 25 à 40 $\mu g/m^3$ pour les particules de moins de 10 micromètres (μm) ou PM_{10} et de 15 à 25 $\mu g/m^3$ pour les particules fines (< 2,5 mm ou $PM_{2,5}$). Pour l'ozone, les États-Unis éliminent graduellement leur objectif de 120 $\mu g/m^3$ sur 24 heures pour le remplacer par 80 $\mu g/m^3$ sur huit heures. Une nouvelle norme pour les $PM_{2,5}$ a été établie à 15 $\mu g/m^3$ par année et à 65 $\mu g/m^3$ pour 24 heures. La norme pour les PM_{10} demeure inchangée à 50 $\mu g/m^3$ et à 150 $\mu g/m^3$ pour 24 heures (USEPA, 1997). Les négociations sur l'ozone et le transport transfrontalier de particules fines ont été prolongées jusqu'à avril 1999. Avec la mise en vigueur de ces nouveaux objectifs pour l'ozone troposphérique, l'USEPA a avancé que, en 2007, les émissions de NO_X seront tombées sous les niveaux atteints dans le cadre du Programme de lutte contre les pluies acides et les programmes de limitation des sources mobiles (Gouvernement du Canada, 1998b).

Réductions des substances toxiques dans l'atmosphère

Les protocoles internationaux sur les polluants organiques persistants (POP) et les métaux lourds visent à réduire les émissions provenant des sources industrielles, des processus de combustion et de l'incinération de déchets. Ces ententes, qui font partie de l'Accord Canada-États-Unis sur la qualité de l'air, ont été signés en juin 1998.

La Stratégie binationale relative aux substances toxiques des Grands Lacs (Stratégie Canada-États-Unis pour l'élimination virtuelle des substances toxiques persistantes dans le bassin des Grands Lacs) engage le Canada à diminuer ses émissions de mercure et de plomb alkylé dans le bassin des Grands Lacs de 90 % d'ici 2000. Les États-Unis se sont engagés à réduire leurs rejets de mercure de 50 % et leur utilisation délibérée du mercure de 50 % d'ici 2006 (Environnement Canada et USEPA, 1997). Aux termes du même accord, le Canada doit réduire ses émissions de dioxines, de furanes, d'hexachlorobenzènes (HCB) et de benzo(a)pyrène (B(a)P) de 90 % d'ici 2000 dans le bassin des Grands Lacs. Les États-Unis doivent effectuer une réduction de 75 % de la totalité de leurs rejets de ces polluants d'ici 2006. La Stratégie binationale relative aux substances toxiques des Grands Lacs s'applique à l'ensemble des rejets dans l'atmosphère et dans l'eau, mais l'accord ne couvre pas le transport à grande distance (TGD) des polluants atmosphériques, lequel a d'énormes répercussions sur les Grands Lacs.

Une prévision par modélisation informatique montre que, même si tous les accords cités plus hauts étaient pleinement mis en application, de nombreuses régions du Canada seraient encore aux prises avec des problèmes de pollution. L'ajout d'un plan de réduction des GES contribuera considérablement à faire baisser nombre de polluants individuels déjà visés par des protocoles. Un plan de réduction des émissions de GES bien conçu sera bénéfique pour l'atmosphère et les écosystèmes aquatiques et terrestres.

4.2 Réduction des émissions des GES et concentrations de particules dans l'air ambiant

Il n'existe pas de « niveau sans danger » pour les particules dans l'air ambiant (Groupe de travail fédéral-provincial, 1999). L'entente canado-américaine sur la pollution atmosphérique transfrontalière ne prévoit pas l'élimination complète des particules de l'air ambiant. Pourtant, cette nouvelle entente permettra de réduire les épisodes des PM_{10} qui varient actuellement entre 100 et 180 $\mu g/m^3$. Elle va également faire diminuer les concentrations de $PM_{2,5}$ dans les villes du Canada où la moyenne des concentrations varie de 20 à 30 $\mu g/m^3$.

Les concentrations de particules fines, étroitement liées à l'utilisation de combustibles fossiles et, par conséquent, aux GES, seront également réduites, ce qui signifiera que les émissions de NO_X, qui se transforment en nitrates en présence d'humidité, seront davantage réduites que ne le prévoit la phase II du Plan fédéral de gestion du smog. Les réductions visées sont de 27 % pour le corridor Windsor-Québec et de 19 % pour la région de Vancouver d'ici 2010 (Gouvernement du Canada, 1997).

Toutefois, il est important de noter que les plus importantes sources anthropiques de particules, à la fois pour les PM_{10} et les $PM_{2,5}$, sont les chaussées non revêtues. On attribue à ces dernières 2020 kt de PM_{10} et 300 kt de $PM_{2,5}$, comparativement à 706 kt de PM_{10} et 585 kt de $PM_{2,5}$ pour les feux de forêt, et 137 kt de PM_{10} et 131 kt de $PM_{2,5}$ pour le chauffage au bois résidentiel (Environnement Canada, 1998). Ces particules ne sont pas susceptibles d'avoir des répercussions sur le climat, puisque leurs sources sont localisées et que leur distribution ascendante dans l'atmosphère est limitée (Leaitch, 1999). Elles peuvent par contre avoir des effets compensateurs sur la phase neutralisante des composés acidifiants, – mais il n'a pas encore été établi jusqu'à quel point. Le chauffage au bois résidentiel, l'industrie du bois et celle du papier, et les véhicules diesels lourds sont les secteurs qui, à la fois, rejettent des particules et sont liés aux GES.

La réduction des GES devrait donc influer sur les apports anthropiques réels de particules, comme on l'a vu dans la section sur les avantages pour la santé. L'Alberta, l'Ontario, le Québec, la Colombie-Britannique et la Saskatchewan, qui sont parmi les plus importants contributeurs de particules fines et grosses, sont les plus susceptibles de tirer avantage de ces diminutions. Par exemple, le Québec pourrait bénéficier le plus des programmes de réduction des GES. Le chauffage au bois résidentiel, qui représente 98 % de la consommation provinciale totale de combustibles non industriels (Environnement Canada, 1998), y constitue en effet une préoccupation pour la qualité de l'air à l'intérieur des habitations. Des programmes visant à réduire l'utilisation des poêles à bois ou à les rendre plus efficaces pourraient contribuer à la qualité de l'air dans cette province.

4.3 Réduction des émissions de GES et concentrations d'ozone troposphérique

L'ozone troposphérique est étroitement lié aux épisodes de concentration élevée de particules fines. Il provient de l'oxydation du méthane et de certains gaz de courte durée de vie (principalement le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et les hydrocarbures non méthaniques (HCNM). Les concentrations dans la troposphère ont doublé dep 25 ppbv, avec un forçage radiatif de + 0,4 (± 0,2) Wm^{-2} (Houghton *et al.*, 1996). Les avantages de la réduction des concentrations d'ozone troposphérique sont de deux ordres : élimination de la toxicité de ce gaz et élimination de son forçage radiatif. Les COV et les NO_X étant les deux principaux précurseurs de l'ozone, la réduction de la consommation de combustibles fossiles réduira la quantité d'ozone troposphérique.

Le corridor Windsor-Québec et la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique, sont les deux régions les plus touchées par l'ozone troposphérique (voir fig. 4.1). Une grande partie de l'ozone troposphérique et d'autres polluants atmosphériques présents dans le corridor Windsor-Québec est due au TGD en provenance des États-Unis. En conséquence, les avantages de la réduction des émissions de GES seront différents pour ces deux régions. L'ozone troposphérique se forme par la transformation photochimique des NO_X et des COV de sources naturelles et anthropiques. En 1995, les sources anthropiques ont produit 2 672 kt de COV, qui provenaient surtout des industries et du transport, c.-à-d. des industries pétrolières et gazières ainsi que des véhicules à essence légers (Environnement Canada, 1998).

Bien que les émissions de COV provenant de sources naturelles soient cinq fois et demie plus élevées que celles de sources anthropiques, ces dernières ont tendance à prévaloir durant les épisodes d'ozone (Gouvernement du Canada, 1997). Les températures élevées, qui exacerbent davantage ce processus dans les régions urbaines, provoquent une plus

Rapports de mélange d'ozone dépassant 82 ppb

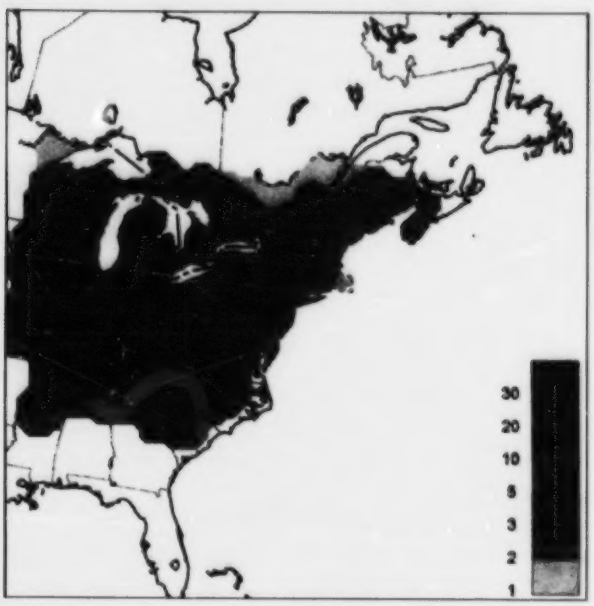


Figure 4.1. Rapport de mélange d'ozone dépassant 82 ppb (Dann et Summers, 1997)

grande vaporisation des solvants et de l'essence, les principales sources de COV. Les réactions chimiques sont régies par le rayonnement ultraviolet (UV), en présence de catalyseurs chimiques, tels que le radical hydroxyle (OH) et le radical peroxyle (H_2O_2). Comme ces réactions sont fonction de la température et du rayonnement, les épisodes d'ozone tendent à être plus intenses les jours d'été chauds et ensoleillés, lorsqu'il y a des anticyclones stagnants.

La végétation peut particulièrement bénéficier de concentrations réduites en ozone troposphérique, puisque les plantes sont plus sensibles au stress causé par l'ozone que les humains (Heck *et al.*, 1998). Même de faibles concentrations d'ozone accompagnées de pics élevés intermittents peuvent entraîner des symptômes chroniques chez certaines plantes. Il serait possible de réduire ou même d'éviter les symptômes aigus comme la chlorose, le retard de croissance, la senescence prématurée ou les nécroses uni ou bifaciales (Groupe de travail fédéral-provincial,1998). Il est également possible d'inverser ou de réduire d'autres effets comme la translocation du carbone du feuillage au tronc et aux racines (Cox *et al.* 1996). En outre, la vulnérabilité découlant des changements du rapport de biomasse du système racinaire au système aérien peut être atténuée, et les plantes pourraient bénéficier d'avantages concurrentiels pour résister aux sécheresses, aux champignons, aux insectes, à la rigueur des hivers ou aux changements climatiques.

L'ozone troposphérique est un gaz toxique puissant, capable de changer la composition des forêts, comme on l'a observé dans les montagnes de San Bernardino, en Californie. Des espèces sensibles, comme le pin ponderosa et le pin de Jeffrey, ont été remplacées par des espèces plus résistantes. Ce changement de structure influe sérieusement sur l'écologie des feux de forêts de la région – du fait de l'importance de la litière, qui résulte de l'augmentation de la sénescence des aiguilles (USEPA, 1997). Avec des niveaux plus bas d'ozone troposphérique, il y aurait moins de matériel inflammable dans les couvertures mortes, et donc moins de feux qui peuvent causer la perte de vies humaines ou des dommages aux biens. Étant donné que les feux de forêts sont la plus importante source naturelle de PM_{10} et de $PM_{2,5}$, leur réduction profitera à la plupart des formes de vie aérobies.

Les fréquences et les durées les plus élevées d'épisodes d'ozone dépassant 82 ppb (objectif de qualité de l'air) ont été enregistrées dans le sud de l'Ontario, dans le corridor Windsor-Québec et dans les régions entourant les Grands Lacs. Or, ces régions abritent la plus forte densité de population et, de l'opinion générale, les terres agricoles les plus productives du pays. Les avantages d'une baisse des concentrations d'ozone troposphérique sont traités au chapitre 5. Des espèces menacées, comme le monarque, bénéficieront également de cette réduction. En effet, c'est dans ces régions que pousse l'asclépiade commune, sensible à l'ozone, seule source de nourriture pour la larve de cet insecte (USEPA, 1997).

4.4 Réduction des émissions de GES et importance des pluies acides

Les particules et l'ozone troposphérique sont composés de NO_X et de SO_2 ou en résultent en partie. Mélangés à l'eau, ces deux gaz forment les acides sulfurique ou nitrique, précurseurs des pluies acides. Le dioxyde de soufre et les NO_X sont les principaux précurseurs des pluies acides. Les émissions d'oxyde de soufre de sources anthropiques ont été estimées à 2 654 kt en 1995 (Environnement Canada, 1998). L'extraction et la fusion des métaux non ferreux y contribuent pour 33 % et l'industrie pétrolière pour 25 %. Les centrales électriques sont quant à elles responsables de 20 % des émissions de SO_X. Les émissions ont baissé au Québec, en Ontario et en Alberta, alors qu'elles ont augmenté au Manitoba. L'extraction et la fusion des métaux non ferreux de cette province représentent 13 % des émissions de l'industrie canadienne et 98 % des émissions totales de SO_X de la province.

Les NO_X contribuent également aux pluies acides. Environ 2 464 kt de NO_X ont été émises au Canada en 1995 (Environnement Canada, 1998). Ce chiffre dépasse la limite établie à 2 124 kt dans le cadre du Protocole relatif à la lutte contre les émissions d'oxydes d'azote signé en 1988 (Barclay, 1998a). Les quatre composants responsables de la majeure partie des émissions (64 % de la totalité des NO_X émis au Canada) sont les véhicules diesels lourds et tous terrains (24 %), l'industrie gazière et pétrolière en amont (13 %), tous les véhicules à essence (17 %) et la production d'électricité (10 %). En fait, 52 % de la totalité des émissions de NO_X enregistrées en 1995 provenait du secteur du transport (Environnement Canada, 1998).

Bien que les dépôts de sulfates demeurent la plus importante cause d'acidification, l'acidification par l'azote gagne en importance dans le sud-est du Canada, en particulier dans le centre et le sud de l'Ontario, et le sud-ouest du Québec (Jeffries, 1997). Les conséquences de l'acidification pour l'azote saperont les avantages écologiques que l'on prévoit tirer de la lutte contre les émissions de dioxyde de soufre.

Les pluies acides sont un problème surtout dans l'est du pays (voir fig. 4.2), la région la plus touchée par le TGD (GTEA, 1997). Les lacs ont été acidifiés, les érables sont en perte de croissance et la fertilité des sols baisse. Bien que les émissions de dioxyde de soufre soient à la baisse (les émissions de 1997 dans l'est du Canada ont décliné de 54 % par rapport à 1980), les émissions de NO_x augmentent. Même après la mise en application de l'entente sur les pluies acides après l'an 2000, qui prévoit une réduction de 50 % des émissions de SO_2 par rapport aux niveaux de 1997, une réduction supplémentaire de 25 % est nécessaire au maintien de la biodiversité des écosystèmes sensibles.

La réduction d'une tonne (1000 kg) de CO_2 élimine 20 kg de SO_2 et 8 kg de NO_x de sources fixes, et environ 0,5 kg de SO_2 et 9 kg de NO_x de sources mobiles comme les voitures (PNUE, 1993). Un calcul préliminaire, fait à partir des données proposées par la Fondation Suzuki (Hornung *et al.*, 1998) et le Sierra Club (Comeau, 1998), indique des réductions des émissions de SO_2 de 2 120 à 3 678 kt, et des réductions des émissions de NO_X de 848 à 1471 kt. Ces chiffres, fondés sur les estimations mondiales fournies par le PNUE, sont très prudents, et encore plus lorsqu'ils sont appliqués au Canada. Le Canada est le pays où la consommation d'énergie est la plus grande par habitant (Last *et al.*, 1998). Les écosystèmes aquatiques et terrestres peuvent bénéficier de ces réductions sur nombre de plans, comme on le verra plus loin.

Écosystèmes aquatiques

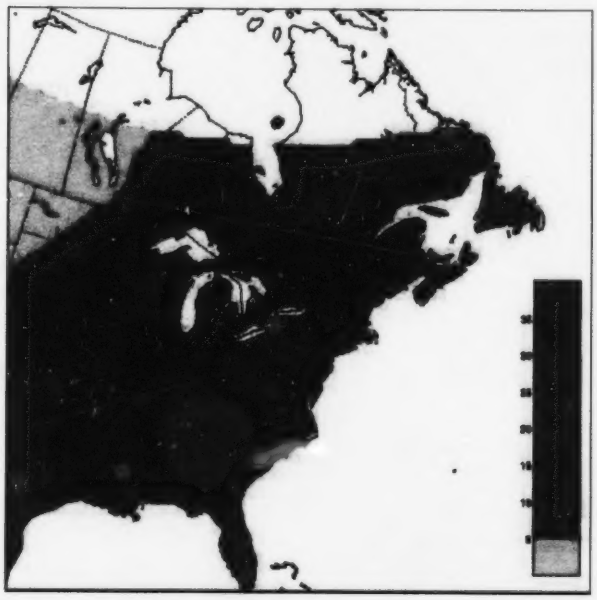
La conséquence la plus grave de l'acidification est observable dans les lacs généralement mal tamponnés de Terre-Neuve et du sud-est du Québec. Ces écosystèmes aquatiques peuvent bénéficier grandement des réductions des concentrations de composés acides. Les lacs de l'Ontario et du sud-est du Québec sont généralement moyennement sensibles.

En fait, certaines des répercussions sur le milieu aquatique peuvent être inversées ou, du moins, stoppées. À mesure que le pH de l'eau du lac descend sous 6,0, la population de certaines espèces commence à décroître. À 5,5,

[1] Le Sierra Club (1998) et la Fondation Suzuki (1998) proposent des réductions de 106 à 183,7 Mt des émissions de gaz à effet de serre.

Meyenne sur 5 ans du dépôt humide excédentaire de sulfate pour les périodes 1980-1984 et 1991-1996, en kg/ha/an

a) Niveaux de dépôt, 1980-1984



b) Niveaux de dépôt, 1991-1996

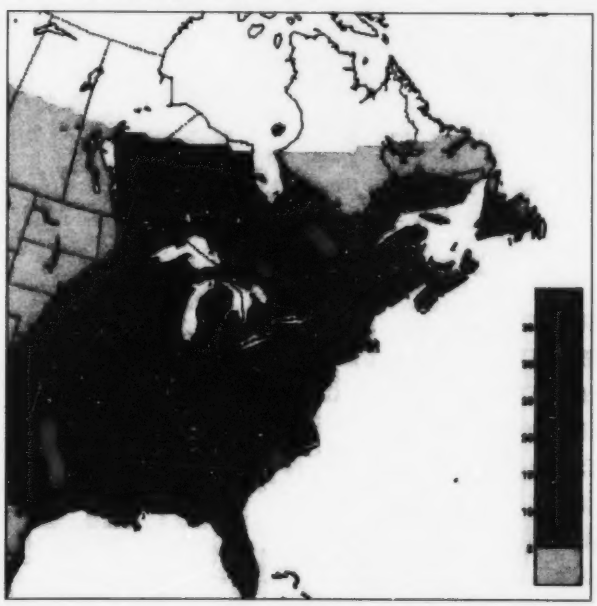


Figure 4.2. Meyenne sur 5 ans du dépôt humide excédentaire de sulfate pour les périodes 1980-1984 et 1991-1996, en kg/ha/an (Ro, 1999)

certaines espèces peuvent disparaître tout à fait, réduisant ainsi la biodiversité de l'écosystème et changeant le réseau trophique (fig. 4.3). À 5,0, les réseaux trophiques sont sérieusement touchés et la plupart des espèces de poissons auront cessé de se reproduire. En dessous de 5,0, certaines espèces d'algues, de bactéries et d'insectes dominent le biote. Certaines de ces espèces d'algues tolérantes aux acides (p. ex., Zygogonium sp., une algue filamenteuse) peuvent souiller les plages et d'autres habitats du littoral (Turner *et al.*, 1995), rendant les activités de loisirs désagréables et modifiant les assemblages naturels des espèces. D'autres espèces d'algues participent à la production de toxines qui peuvent tuer les poissons. Avec moins de sulfates et de nitrates, les stress chroniques découlant des déséquilibres chimiques peuvent diminuer, permettant aux populations de poissons et, dans certains cas, aux niveaux de diversité, de se regénérer.

L'acidification des lacs crée une réaction chimique en chaîne dans les écosystèmes aquatiques. Les concentrations de mercure mesurées dans les poissons présentent une corrélation négative avec le pH. On sait que des concentrations élevées de mercure ont des effets graves sur les espèces sauvages. Les pH bas dans les lacs sont liés non seulement à des concentrations élevées de mercure, mais également à de fortes concentrations de cadmium et de plomb dans les poissons. On soupçonne également qu'un pH bas dans les lacs sensibles à l'acidité puisse exacerber la bioaccumulation de cadmium dans le poisson (Scheuhammer, 1996). McNicol *et al.* (1997) croient que de faibles concentrations de calcium entraînent une augmentation du transport actif et passif du mercure à travers les branchies en raison de la nature compétitive de ces deux cations. Comme le mercure se lie très facilement aux substances organiques et humiques, des charges accrues de composés organiques peut être associées à des quantités accrues à la fois de mercure et de mercure méthylé – la forme de mercure qui s'accumule le plus rapidement dans les tissus du biote. Il est possible, en réduisant l'acidification, de stopper l'accumulation de composés toxiques dans le réseau trophique.

La perte du carbone organique dissous (COD) dans les eaux de surface en raison de l'acidification (fig. 4.4) pourrait également être inversée. En effet, le carbone organique dissous joue un rôle important dans les écosystèmes aquatiques : il sert de catalyseur dans la chaîne alimentaire microbienne, atténue le rayonnement solaire de toutes les longueurs d'onde (y compris les UV-B), diminue la profondeur de la

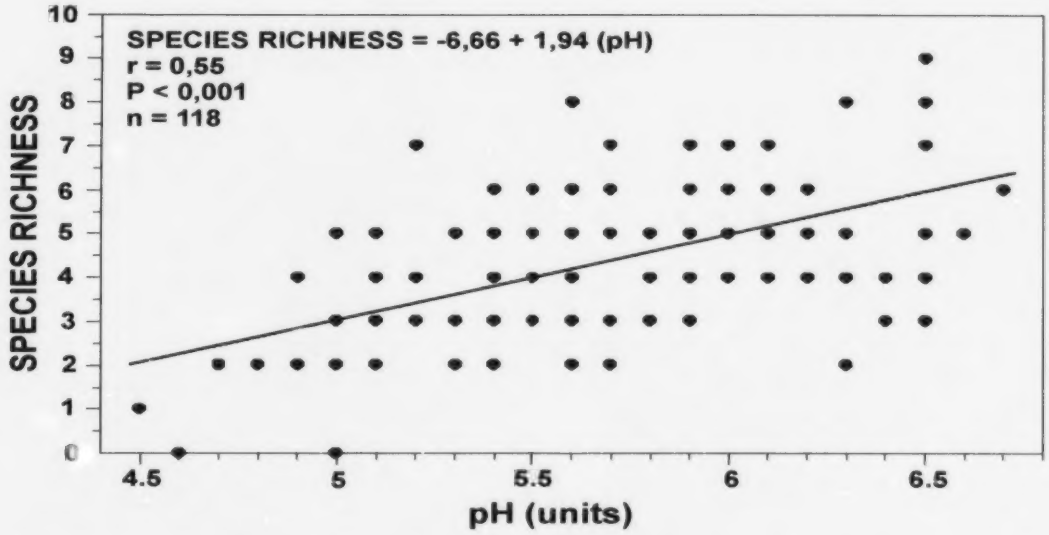


Figure 4.3. Relation entre le nombre d'espèces de poissons et le pH dans 118 lacs de l'Outaouais et de l'Abitibi, au Québec (Jeffries, 1997)

thermocline et participe à un certain nombre de réactions photochimiques (Schindler, 1998). Il a été démontré que les niveaux actuels de rayonnement UV-B inhibent à la fois la photosynthèse et la croissance du phytoplancton. Dans les lacs oligotrophes clairs, le rayonnement peut limiter l'habitat offert au zooplancton et aux autres organismes aquatiques vivants près de la surface.

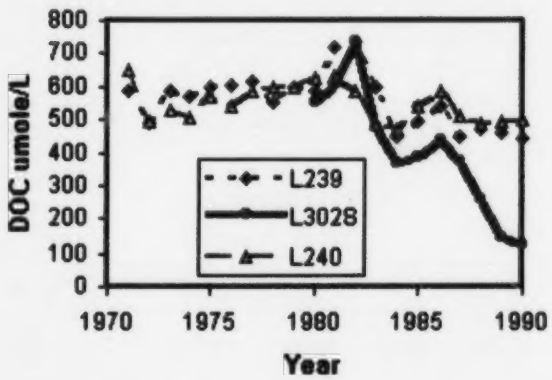


Figure 4.4. Concentration annuelle moyenne de COD avec le temps dans trois lacs de la région des lacs expérimentaux. Le pH du lac L302S est passé de 6 à 4,5 (Schindler, 1998)

La réduction des dépôts acides pourrait en fait mener à une amélioration du pH des lacs de la région de l'Atlantique, qui n'ont pas connu d'amélioration depuis dix ans (Jeffries, 1997). Toutefois, les changements climatiques ont une incidence négative sur le rétablissement. Au cours des périodes de sécheresse, le soufre réduit qui s'est accumulé durant les années de dépôts élevés de sulfates s'oxyde et est relâché avec les premières pluies, d'où une réacidification ou un recul du rétablissement des lacs (Bayley *et al.*, 1986). Dillon *et al.* (1997) ont établi un lien entre les périodes de sécheresse et les épisodes El Niño – après chacun de ces épisodes, l'Ontario a connu une sécheresse. La fréquence des épisodes El Niño des dernières années (Francis et Hengeveld, 1998) pourrait jouer un rôle dans la réacidification, renforçant ainsi la nécessité de réduire les rejets d'agents acidifiants en plus des émissions de GES.

Les réductions des émissions des GES aideront à dépasser l'objectif de 50 % de réduction des émissions de SO_2 d'ici 2010, ce qui, jumelé à la réduction des émissions de NO_X, pourrait aider à atteindre le critère de charge critique (pH 6) dans de nombreux lacs de la région boréale du sud-est, diminuant ainsi la superficie touchée d'environ 890 000 hectares et augmentant la biodiversité. La réduction des émissions empêcherait aussi quelque 162 000 populations de

poissons de s'éteindre (Jeffries, 1997). Le rétablissement des lacs peut être possible, si le pouvoir tampon naturel ne décline pas (McCrea et Burrows, 1998).

Écosystèmes forestiers

On estime que de 20 à 30 millions d'hectares des forêts canadiennes sont exposés aux dépôts de sulfates et de nitrates, et que leur sol présente (ou est tout près de présenter) la charge critique. L'acidification des sols réduit la germination et modifie la disponibilité des éléments nutritifs et des métaux lourds (USEPA, 1997). Malgré des changements relativement faibles du pH de certains bassins hydrographiques, des quantités importantes de calcium et de magnésium sont lessivées au point où la conservation de la fertilité des sols et de la productivité de la forêt est en danger (Houle *et al.*, 1997). La fertilité du sol se dégrade rapidement, au taux actuel de dépôt acide. Ces impacts, énoncés dans le Rapport d'évaluation de 1997 sur les pluies acides au Canada, (qui seront réduits, étant donné la diminution des niveaux de dépôt résultant des réductions des émissions de GES sont résumés ci-après (Hall *et al.*, 1997).

- Endommagement de la cuticule protectrice des feuilles ou des aiguilles des arbres.
- Diminution nette de la photosynthèse et de l'absorption d'éléments nutritifs; cet effet s'accroît avec l'absorption de sulfate.
- Diminution du pouvoir germinatif du pollen du bouleau blanc et du bouleau blanc des montagnes en raison du brouillard ou de la bruine acides de pH inférieur à 5,6.
- Baisse de la résistance au gel.
- Augmentation de la vulnérabilité à la pollution et aux perturbations climatiques.
- Augmentation du rapport aluminium-calcium dans le tissu ligneux, entraînant la mort des arbres. La mobilisation de l'aluminium par l'acidification du sol entrave l'absorption et le transport des cations basiques, comme le phosphore et le potassium, par l'arbre (Mahony *et al.*, 1997).
- Contribution à des carences en éléments nutritifs, qui feront probablement augmenter la vulnérabilité des arbres aux sécheresses, aux tempêtes de verglas, et aux infestations d'agents pathogènes et d'insectes (Watmough et Hutchinson, 1998).

4.5 Réduction des émissions des GES et concentrations de mercure

Un lien a récemment été établi entre le mercure et les gaz à effet de serre. On croit que les substances responsables de l'appauvrissement de l'ozone sont également responsables du passage du mercure de l'état gazeux à l'état particulaire (Schroeder *et al.*, 1999). Les espèces chimiques très réactives réagissent avec le mercure gazeux normalement inerte (composé principalement de vapeur de mercure élémentaire) et l'oxydent en un ou plusieurs de ses composés, à pression de vapeur beaucoup plus basse que celle du mercure moléculaire. Les composés beaucoup moins volatils, comme l'halogénure ou les oxydes de mercure, existent à l'état particulaire. Le mercure sous cette forme peut se déposer facilement dans les écosystèmes terrestres ou aquatiques, suivant ainsi la voie du méthylmercure biologique, qui a la capacité unique de se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire. La bioaccumulation peut entraîner de graves dommages neurologiques, en particulier chez les fœtus et les jeunes enfants (Schroeder *et al.*, 1999).

Les principales sources de mercure atmosphérique sont l'utilisation de combustibles, l'exploitation aurifère, la fabrication de produits chimiques, la circulation routière et aérienne, et l'incinération de déchets. Une grande partie du mercure présent au Canada vient par TGD de la vallée de l'Ohio. Cette région compte un grand nombre de centrales électriques au charbon. La réduction des concentrations de ce polluant toxique présente un intérêt puisque l'on a des indications que l'acidification des masses d'eau augmente l'accumulation de mercure dans les tissus des poissons. Le programme de lutte contre les dépôts acides peut déjà avoir fait baisser le taux d'accumulation du mercure dans les poissons et, par conséquent, avoir profité à la santé des niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire qui consomment du poisson (notamment l'homme). Malheureusement, les concentrations de mercure dans les poissons ne sont pas surveillées de façon continue.

Les concentrations inacceptables de mercure dans les poissons sont devenues un problème omniprésent. Les concentrations mondiales de mercure atmosphériques semblent augmenter d'environ 0,6 à 1,5 % par année (Mierle, 1997a). Le fait que l'on compte deux fois plus de mercure dans l'atmosphère de l'hémisphère Nord peut expliquer les augmentations récentes des concentrations de mercure à la surface des sédiments dans des lacs éloignés des sources ponctuelles et dans l'Arctique. Le réchauffement climatique influe également sur le degré d'accumulation de mercure. Les eaux tempérées favorisent la formation de méthylmercure, et le rayonnement UV-B et les pluies acides catalysent cette formation (Schindler, 1999).

Les réductions des émissions des GES entraîneront une baisse des dépôts acides et une hausse du COD, réduisant ainsi la pénétration du rayonnement UV-B et la bioaccumulation du mercure dans les poissons. Elles seront bénéfiques non seulement pour les espèces sauvages, mais aussi pour la santé humaine. C'est le sud-est du Canada, où les dépôts acides sont les plus importants, qui profitera le plus de ces réductions.

Le mercure et les espèces sauvages

On a trouvé du mercure dans les poissons de toutes les régions, en particulier en Ontario, et sa concentration semble augmenter avec la taille du poisson. Environ 80 % de la population de gros dorés jaunes de l'Ontario contient plus de 0,5 ppm de mercure et 10 % en contient plus de 1,5 ppm, soit beaucoup plus que les niveaux recommandés pour la consommation humaine (Mierle, 1997b).

Il a été fait plus de recherches sur les effets du mercure sur l'homme, que sur ses effets sur les espèces sauvages. Mierle (1997b) avance que, même si la relation dose-réponse n'a pas été établie pour les espèces sauvages, un certain nombre d'études laissent supposer que, pour la plupart des espèces, des concentrations de 0,3 à 2,0 ppm dans la nourriture engendront des effets toxiques.

Par exemple, des concentrations de 0,9 ppm de mercure dans l'alimentation des visons leur ont été fatales après environ trois mois et ont provoqué de l'émaciation chez les huards sauvages. En outre, la reproduction des huards est affaiblie quand la concentration de mercure dans les poissons qu'il consomme dépasse 1 à 2 mg/g (Scheuhammer et Blancher, 1994), ce qui est le cas dans 5 à 30 % des lacs ontariens. À 0,6 ppm, l'efficacité de reproduction des mallards était annulée. Les lignes directrices en matière de consommation humaine n'offrent pas de protection aux espèces sauvages. McNicol *et al.* (1997) ont trouvé que les effets létaux et sublétaux de l'exposition alimentaire au mercure de divers oiseaux ont été démontrés à des concentrations aussi basses que 1 à 2 mg g-1 (poids sec). La sensibilité varie d'une espèce à l'autre. Il existe peu d'études des effets du mercure sur les mammifères sauvages. On mentionne que la concentration de mercure diminue avec l'âge chez les loutres et les visons (Evans *et al.*, 1997). Elle était plus élevés chez les loutres de moins de deux ans que chez celles de deux à six ans. Les concentrations de mercure étaient aussi plus élevées chez les animaux de plus de six ans que chez ceux de deux ans à six ans. Il était difficile de trouver des individus plus âgés. On pourrait en extrapoler que seuls les individus qui présentent une faible contamination par le mercure survivent.

4.6 Autres substances toxiques

La réduction des émissions de gaz à effet de serre peut également avoir une incidence importante sur le TGD des substances toxiques dans l'atmosphère, en ce sens que l'importance de l'« effet sauterelle » serait ralenti si la température mondiale était plus élevée. L' « effet sauterelle » décrit le fait que des substances toxiques comme les pesticides (épandues sur des champs il y a 50 à 60 ans) s'évaporent avec la chaleur, sont transportées par le vent et redéposées dans régions plus froides. Il est amplifié dans les pays au climat froid comme le Canada, car les substances toxiques ainsi déposées ne peuvent pas « rebondir ». Ce phénomène est connu sous le nom d'effet de distillation à froid et explique une grande partie de la pollution de l'Arctique. On trouve un certain nombre de polluants organiques persistants (POP), dont des pesticides comme le DDT et le toxaphène, dans les Grands Lacs, les montagnes Rocheuses et l'Arctique (RIDA, 1998). Ces polluants y tombent sous forme de pluie ou de neige, et rejoignent les cours d'eau et les lacs pour être absorbés par les plantes et, à terme, par les poissons.

La réduction de la consommation d'énergie diminuera la quantité de polluants émise par la combustion de com-

bustibles fossiles. Par exemple, on sait que les sources fixes et mobiles (p. ex., voitures, camions) sont les plus importants responsables de l'émission de polluants atmosphériques dangereux (le benzène et le butadiène-1,3 sont tous les deux toxiques aux termes de la LCPE) (Environnement Canada, 1999). Les centrales thermiques émettent dans l'air des traces d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), de métaux lourds comme le mercure et le cuivre et de radionucléides; elles rejettent des eaux usées contaminées et produisent des déchets solides contaminés (Eaton *et al.*, 1994). Les centrales au charbon émettent des HCB. Les réductions des émissions de GES résulteront d'une baisse de la combustion de combustibles fossiles, source de substances toxiques comme l'arsenic, le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb, le cuivre, le fluor, le zinc et les HAP.

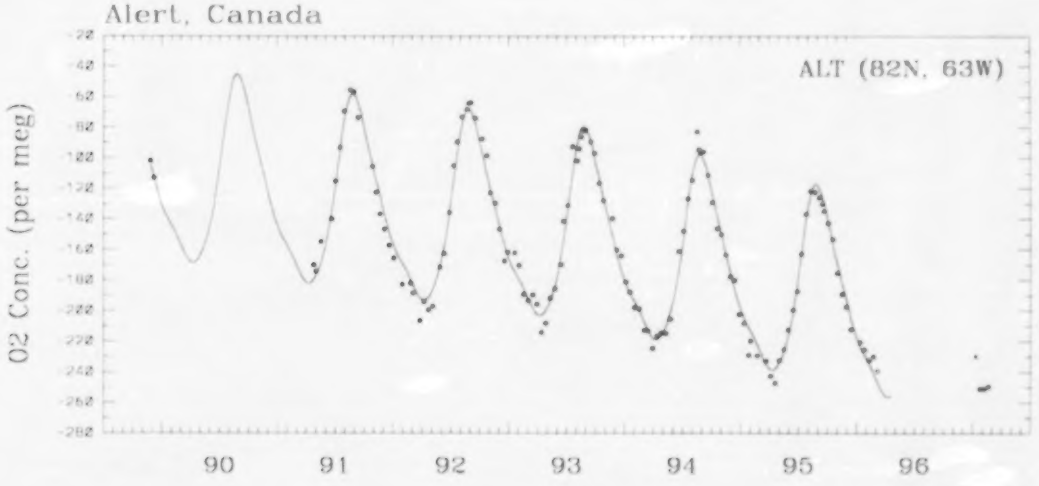


Figure 4.5. Concentration d'oxygène exprimées en variations du ratio O_2/N_2 (Keeling *et al.*, 1999)

4.7 Avantages de la réduction des concentrations de CO_2

La réduction des émissions de GES fera également baisser la consommation d'oxygène nécessaire à la formation du CO_2. Les concentrations d'oxygène ont été surveillées à Alert, dans les T. N.-O., depuis 1990 et, comme l'indique la figure 4.5, le ratio O_2/N_2 a tendance à baisser. Bien que cette tendance semble faible, Keeling *et al.* (1999) indiquent que les observations montrent un grand déficit d'oxygène potentiel dans l'hémisphère Nord par rapport à l'hémisphère Sud. Une augmentation indéterminée des concentrations de CO_2 créerait un déséquilibre de l'élément essentiel à notre survie.

Les effets positifs du CO_2 sur la végétation seraient accrus si les effets nuisibles des pluies acides et de l'ozone troposphérique étaient éliminés. Le CO_2 est un fertilisant pour les plantes. En effet, celles où le premier composé formé par photosynthèse comporte trois atomes de carbone (C_3) croissent davantage en présence de concentrations élevées de CO_2 (fig. 4.6). Les rendements augmentent, et elles utilisent l'eau plus efficacement. Ce fait peut être important, puisque 16 des 20 principales cultures sont du type C_3. De plus, 14 des 18 des mauvaises herbes les plus nocives sont du type C_4), et ne devraient donc pas réagir aussi vigoureusement que les 16 types de plantes vivrières. Toutefois, l'on a des indications que les mauvaises herbes réagissent mieux à l'augmentation du CO_2, quel que soit leur mécanisme de photosynthèse. Cette situation, combinée à une chaîne d'effets secondaires, complique le résultat final.

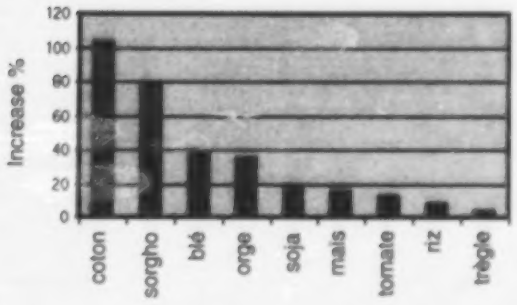


Figure 4.6. Augmentation prévue du rendement de neuf grandes cultures avec un doublement des concentrations de CO_2 (PNUE/GEMS, 1987).

De façon empirique, il semble que la croissance s'élève de 0,5 à 2,0 % pour chaque augmentation de 10 ppmv de CO_2 (PNUE/GEMS, 1987). Des expériences montrent que, malgré une augmentation de la biomasse, la qualité nutritive des plantes a tendance à diminuer lorsque les concentrations de CO_2 augmentent. Il a été montré que les ravageurs qui se nourrissent de feuilles de soja doivent en consommer davantage pour atteindre le niveau de protéine azotée requis. Ils peuvent alors causer plus de dommages dans les environnements riches en carbone (PNUE/GEMS, 1987). Des taux élevés de CO_2 ralentissent la décomposition, d'où un stockage de C dans le sol en raison de l'abondance limitée de l'azote (Wood *et al.*, 1994). Il s'ensuit que, à l'échelle de la planète, les limites en éléments nutritifs limiteraient à terme la réaction des plantes à l'enrichissement en gaz carbonique.

4.8 Réduction des émissions de GES et baisse du rayonnement UV-B

Les concentrations d'ozone stratosphérique déclinent à un rythme constant de 5 % par décennie depuis 1980 (voir fig. 4.7) (Wardle *et al.*, 1997; Oltmans *et al.*, 1998; Tarasick, 1999; Anlauf, 1999). Une série de réactions photochimiques mettant en cause l'ozone et l'oxygène moléculaire (O_2) se produit dans la stratosphère. L'ozone absorbe fortement le rayonnement solaire (dans la plage de 210 à 290 nm) tandis que l'oxygène moléculaire l'absorbe aux longueurs d'onde de moins de 200 nm. Aux longueurs d'onde de 280-320 nm, l'absorption par l'ozone s'affaiblit. L'absorption des rayons UV (essentiellement par l'ozone) est un facteur important de l'augmentation de la température avec l'altitude dans la stratosphère. Par une série de réactions chimiques, le rayonnement solaire dissocie O_2 pour former O_3 et libérer de la chaleur. Le flux de photons des rayons UV-B actifs photochimiquement (longueur d'onde £ 315 nm) dans la troposphère est limité par la quantité d'ozone stratosphérique.

Le rétablissement de l'ozone stratosphérique prendra environ 150 ans. Lentement, les niveaux actuels de l'irradiation solaire à 300 nm devraient diminuer de 35 % par an en hiver et de 6,7 % par an en été à Toronto (Kerr et McElroy, 1993), pour atteindre les niveaux d'avant l'appauvrissement de la couche d'ozone. En même temps l'irradiation érythémateuse (la longueur d'onde la plus dommageable pour la peau) devrait diminuer lentement par rapport à sa valeur actuelle, de + 5,3 % par an en hiver et de + 1,9 % par année en été (Kerr et McElroy, 1993). Les effets suivants commenceront aussi à prendre une tendance inverse.

- On a constaté que les rayons UV-B influent sur la photosynthèse et la résistance stomatique à la perte d'eau par transpiration et à l'absorption du CO_2. On a également des indications qu'ils influent sur la viabilité du pollen, réduisent la croissance en hauteur des semis et diminuent la croissance de la surface foliaire. Des 26 arbres étudiés, douze ont montré une diminution de la croissance, seulement deux une augmentation de la croissance et douze une tolérance aux UV-B (Krupa et Kickert, 1989).

- Les écosystèmes d'eau douce peu profonde sont particulièrement vulnérables aux niveaux élevés de rayonnement UV-B, et montrent des changements dans la productivité primaire, les cycles des substances nutritives, la structure des communautés, et une modification du transport des substances chimiques toxiques dans la chaîne alimentaire. Le COD atténue les UV-B dans les eaux de surface. Malheureusement, la pénétration des UV-B a augmenté de 22 à 60 % (Wardle *et al.*,

[2] L'irradiation érythémateuse est l'irradiation spectrale des rayons UV, multipliée par le spectre d'action McKinley-Diffey pour l'érythème (brûlure de la peau), intégrée et divisée par 25 mWm^{-2} (Burrows *et al.*, 1994).

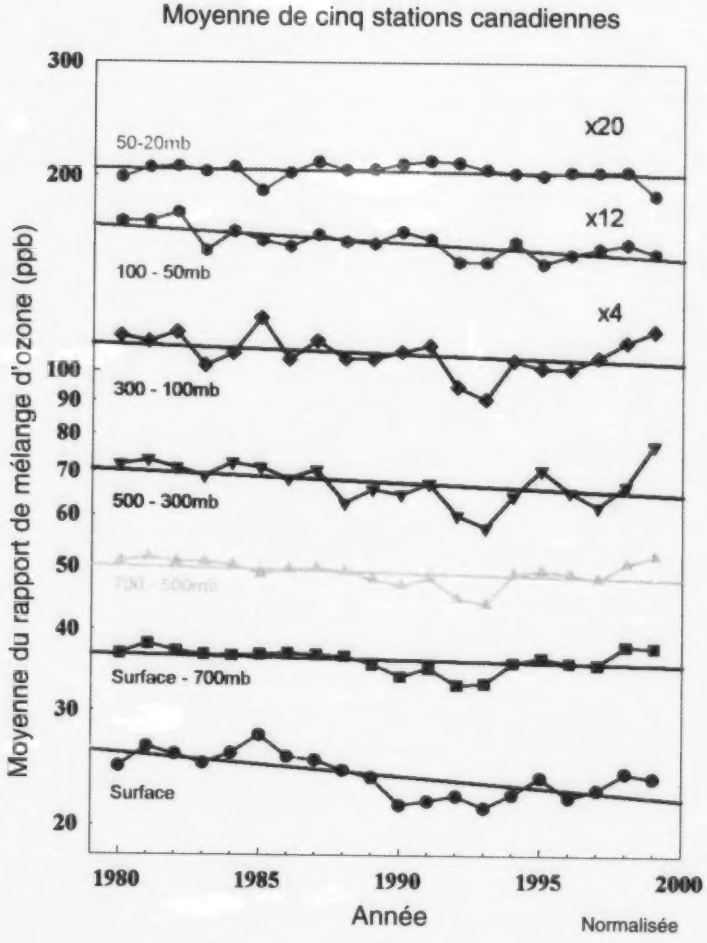


Figure 4.7. Mesures de l'ozone dans la troposphère libre, montrant une baisse très semblable à celle qui survient dans la stratosphère (Tarasick, 1999)

1997) en raison des dépôts acides et du réchauffement du climat (Schindler *et al.*, 1996).

D'autres effets de l'augmentation du rayonnement UV-B (causés par l'appauvrissement de l'ozone) pourraient commencer à être inversés :

- augmentation des cancers de peau;
- suppression des éléments cellulaires du système immunitaire humain;
- dommages à la membrane entourant la cellule, aux chloroplastes et à l'ADN des plantes;
- cataractes;
- autres anomalies biologiques (Wardle *et al.*, 1997).

Inversement, le SO_2 agit comme compensateur en absorbant les rayons UV-B. Ce phénomène a été observé au Japon où le panache du volcan Kagoshima a réduit l'indice UV de 25 % (Wardle *et al.*, 1997). Dans des régions industrialisées, où les concentrations d'aérosols de sulfates sont particulièrement élevées, le refroidissement induit par les aérosols peut représenter plus de 25 % du réchauffement causé par le CO_2 (Rodhe *et al.*, 1995). Si les études

scientifiques, les modèles et les politiques ne visent qu'un agent à la fois, les problèmes environnementaux risquent d'être exacerbés.

À la fin des années 80, l'on croyait que la tendance à la hausse des concentrations d'ozone troposphérique pouvait compenser jusqu'à 20 % de la perte d'ozone stratosphérique dans certaines régions (Krupa et Kickert, 1989). Cette hypothèse n'a pas fait l'unanimité, précisément parce que, dans certaines régions, comme le Canada, les concentrations d'ozone troposphérique déclinent au même rythme que l'ozone stratosphérique (fig. 4.7). La réduction des émissions des GES qui détruisent l'ozone, comme le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), le chlorométhane (CH_3Cl), les chlorofluorocarbures de synthèse (CFC), les chlorocarbures (CC) et les composés de brome organique (OB), préviendra une destruction supplémentaire de la couche d'ozone.

4.90 Réduction des émissions des GES et réduction de la concentration de monoxyde de carbone

Un plan efficace de réduction de l'émission de GES permettrait également d'éviter des épisodes de forte teneur en CO dans l'air ambiant. En 1995, environ 10 355 kt de CO provenant uniquement de sources anthropiques ont été rejetés dans l'atmosphère (Environnement Canada, 1998). C'est le quadruple des émissions de SO_X ou de NO_X.

Le transport a contribué pour 65 % à l'ensemble des émissions, suivi de la consommation industrielle (21 %) et non industrielle (10 %) de combustibles. Les émissions viennent en premier lieu de l'Ontario (31%), du Québec (20 %), de l'Alberta (14 %) et de la Colombie-Britannique (12 %). Les véhicules à essence légers ont été la source de pollution la plus importante dans chaque province, sauf à Terre-Neuve, où le chauffage au bois résidentiel représente 36 % des émissions, comparativement à 23 % pour les voitures.

Le monoxyde de carbone réagit principalement avec l'ozone (O_3), et les radicaux hydroperoxyle (HO_2) et hydroxyle (OH). Dans 90 à 95 % des cas, ces derniers sont des puits pour le monoxyde de carbone (Novelli *et al.*, 1998). La réduction des concentrations de GES se traduira par une diminution du CO dans l'atmosphère. Ainsi, davantage de OH réagira avec des gaz comme le méthane (CH_4) et les chlorofluorocarbures halogénés (CFC).

Vu les incidences du CO sur la qualité de l'air de la région, la réduction de ses concentrations entraînera une diminution des concentrations d'ozone troposphérique. Dans les régions bénéficiant d'assez de NO_X ($NO + NO_2$), le HO_2 produit par l'oxydation du CO induit des réactions photochimiques qui se traduiront par une formation nette d'ozone troposphérique (Novelli *et al.*, 1998).

$$OH + CO \rightarrow H + CO_2$$
$$H + O_2 \rightarrow HO_2$$
$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$$
$$NO_2 + UV \rightarrow NO + O$$
$$O + O_2 \rightarrow O_3$$

Effet net : $CO + 2O_2 \rightarrow CO_2 + O_3$

4.10 Conclusion

Les avantages de la réduction des émissions de GES pour la qualité de l'air doivent être évalués d'un point de vue multidisciplinaire. Comme on l'a mentionné plus haut, nombre des polluants atmosphériques sont liés entre eux de façon complexe. Pour déterminer quelles mesures de réduction des émissions de GES seront les plus efficaces, il faudra les évaluer en termes de gains concernant d'autres polluants atmosphériques. Il faudra garder à l'esprit, dans cette évaluation, que les liens sont complexes et que, dans nombre de cas, ils n'ont pas encore été établis. Actuellement, les avantages pour les écosystème pourraient être sous-évalués. Par exemple, examinons les avantages de la réduction des dépôts acides sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. Les réductions supplémentaires des concentrations de SO_2 et de NO_X aideront à sauver les quelque 890 000 hectares de lacs, 162 000 populations de poissons et 20 à 30 millions d'hectares de forêts actuellement touchés.

Le présent document est loin de constituer une base d'évaluation des avantages à l'échelon régional d'un programme de réduction des GES. Il est clair que les améliorations les plus évidentes viseront les pluies acides, les particules de l'air ambiante et l'ozone troposphérique. Par contre, l'on s'attend à moins d'améliorations sur des problèmes de portée mondiale, comme le rayonnement UV-B et le TGD

des polluants toxiques. Il faut faire preuve de prudence pour éviter de compter deux fois les avantages de la réduction des émissions de GES. Les gains tirés des engagements actuels doivent être conservés.

Les engagements en matière de polluants atmosphériques, discutés plus haut, sont établis à différents pourcentages (voir tableau 4.2). Aucune cible n'y a été établie pour l'ozone troposphérique, qui résulte de trois composés différents, les COV, les NO_X et le CO. Dans le cadre du programme de lutte contre les pluies acides, aucune cible n'a été fixée pour le CO et les COV, l'objectif ne concernant que les NO_X. La réduction prévue des concentrations d'ozone troposphérique résultera seulement des réductions de l'émission des GES. Dans d'autres cas, le pourcentage supplémentaire gagné grâce à la réduction des émissions de GES se situe dans la partie blanche de chaque barre (c.-à-d. qu'il s'additionne aux engagements actuels). Le chevauchement des avantages qui sera observé avec les premiers engagements peut compenser les coûts de la réduction; c'est pourquoi les économies doivent également être prises en considération dans l'évaluation. Les avantages varieront selon le type de polluant. Par exemple, la réduction des concentrations de substances toxiques sera minime en comparaison de la réduction des concentrations de CO, qui n'est visée par aucun des autres programmes de réduction.

Tableau 4.2 Engagements actuels en matière de qualité de l'air

Substances toxiques dans l'air		90 %	
Particules de l'air ambiant		23 %	
Ozone troposphérique	COV		
	NO_x		
	CO		
NO_x		10 %	
SO_2		50 %	

100%

5.0 ÉVALUATION DE L'IMPORTANCE RELATIVE DES EFFETS

Même s'il existe un grand nombre d'estimations de l'importance globale de la réduction des émissions de GES, on s'entend en général sur les secteurs qui profiteront des avantages connexes. Ce sont les avantages pour la santé humaine découlant d'une meilleure qualité de l'air qui ont retenu le plus d'attention dans la littérature (Lee Davis *et al.*, 1997), tandis que les effets sur l'environnement et le bien-être collectif ont été moins étudiés. Il n'est peut-être pas surprenant que la valeur estimée des effets positifs pour la santé humaine ait été l'élément principal de la plupart des évaluations, particulièrement en ce qui concerne les décès prématurés qu'éviterait une exposition réduite à diverses formes de particules.

Les décès prématurés évités représentent de 75 à 85 % environ de tous les avantages estimés dans les évaluations économiques liées à une meilleure qualité de l'air (Burtraw et Toman, 1997). La valeur associée à cette baisse du taux de mortalité dépasse de façon constante celle de divers indicateurs liés à une baisse du taux de morbidité. Cependant, on se demande si les études portant sur la santé humaine tiennent compte de tous les avantages touchant la morbidité, particulièrement lorsqu'il n'est pas question d'hospitalisation. Il est possible que ces avantages soient beaucoup plus importants que ce qu'indique la littérature; un rajustement dans ce secteur accroîtrait donc la valeur totale de l'incidence et des effets, en plus de modifier leur importance relative. En outre, la valeur des avantages (ou des dommages évités) pour l'environnement et le bien-être collectif, du moins lorsqu'ils sont pris en considération, tend à être encore plus basse et ce, par de nombreux ordres de grandeurs.

Aucune étude antérieure n'a évalué directement les effets d'une réduction des émissions de GES au Canada. Cette lacune dans les connaissances soulève une question fondamentale, à savoir si l'importance relative des effets au Canada est très différente de celle estimée pour d'autres pays. Un examen de la littérature ajoute à l'incertitude, car il laisse entendre que l'importance relative des avantages connexes d'une réduction des effets négatifs, pour d'autres secteurs au Canada, peut être plus considérable que prévu. Ces avantages connexes comprennent la réduction des effets négatifs sur l'agriculture et l'exploitation forestière, l'amélioration du bien-être collectif et les effets positifs sur la santé humaine autres que ceux associés uniquement aux matières particulaires.

La littérature fournit beaucoup d'indications que les effets négatifs de divers polluants et problèmes atmosphériques sur les systèmes naturels et humains peuvent être considérables, tant individuellement qu'ensemble. Il est donc fort possible que la valeur des effets évités en matière d'environnement, de bien-être collectif et de santé humaine soit plus élevée que prévu. C'est assurément le cas si les avantages et les coûts non directement liés aux émissions et à la qualité de l'air entrent aussi dans l'estimation des avantages connexes.

Dans le présent chapitre, nous présentons un examen de la littérature afin d'évaluer, de façon préliminaire, l'importance relative des effets liés à la réduction des GES. Comme pour les incidences des changements climatiques, l'estimation des effets et de leur valeur comporte de nombreuses incertitudes pour un vaste éventail de polluants et de problèmes atmosphériques, ainsi que pour une gamme encore plus vaste de voies d'endommagement. La littérature est déjà très divisée en ce qui concerne les effets positifs et leurs valeurs pour la santé humaine. Si nous poussons notre évaluation au-delà de ces effets, les incertitudes deviennent encore plus problématiques, et les risques de relations antagonistes et synergiques s'accroissent. Malgré ces réserves, un survol qualitatif de la littérature donne de nombreux aperçus de l'importance relative des effets pour l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine.

5.1 Effets sur l'environnement

À observer le dépérissement des forêts et le déclin de la productivité agricole, on s'est demandé si l'exposition continue à divers polluants affectait la santé de l'environnement au Canada. Cette préoccupation a, à son tour, mené à l'examen des stress atmosphériques subis par de nombreuses espèces d'arbres et de cultures. De nombreuses analyses des relations dose-réponse ont été menées dans des systèmes à exposition contrôlée (p. ex., chambres de culture), en serre ou en champ, et on reconnaît généralement que les dépôts acides ont un effet plus important sur la productivité forestière que O_3. Par contre, il a été démontré que O_3 avait

un effet plus important sur les cultures agricoles que les dépôts acides. L'accroissement du rayonnement UV-B peut également avoir un effet sur les forêts et l'agriculture, mais les recherches menées jusqu'à maintenant sont assez limitées, révélant une lacune des connaissances sur les effets interactifs et à long terme de ce stress atmosphérique.

La présente section traite principalement des effets des dépôts acides et de O_3. Étant donné que les UV-B constituent un problème d'échelle mondiale, il est peu probable que les efforts des Canadiens pour réduire les émissions des polluants qui contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone produisent des effets importants de nature locale ou immédiate. On ne peut non plus s'attendre à ce que la réduction des émissions de GES au Canada puisse, à elle seule, avoir une incidence importante sur l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Cet appauvrissement et l'accroissement du rayonnement UV-B sont traités en fonction de la façon dont ils interagissent avec d'autres stress atmosphériques pour produire des effets supplémentaires sur l'environnement, ce qui donne aux réductions des émissions de GES une importance encore plus grande.

La grande majorité des études scientifiques des effets sur l'environnement tendent à être axées ce que l'on peut appeler les « effets de premier ordre » (p. ex., croissance des arbres et rendement des cultures). Sauf pour les incidences des changements climatiques, on manque de documents qui étendent l'analyse au niveau suivant des effets dans l'économie. Habituellement appelés « effets de second ordre », ceux-ci sont encore plus difficiles à quantifier, mais pourraient néanmoins être importants. Dans le cas de l'environnement, les effets de second ordre comprennent les avantages pour les familles agricoles, les travailleurs forestiers et les nombreuses industries qui fournissent des intrants et effectuent une transformation à valeur ajoutée des extrants de ces activités primaires. Même si ces valeurs sont difficiles à mesurer, on s'attend à ce que les effets secondaires soient importants, surtout pour les collectivités et les régions qui sont très tributaires de l'agriculture, de la pêche ou de l'exploitation forestière. Néanmoins, les effets et les avantages peuvent ne pas s'arrêter ici, mais s'étendre même jusqu'à des questions de durabilité et de santé spirituelle. Comme le font remarquer Hall *et al.* (1997) :

> la préservation de la santé de l'écosystème forestier est essentielle à la viabilité des forêts canadiennes et au bien-être global du pays (p. 34).

En fait, il est difficile de séparer la santé des écosystèmes de celles de l'environnement, du bien-être collectif et de la santé humaine. Les fonctionnements durables des systèmes environnemental, social et économique sont inextricablement liés et ont des conséquences directes sur la santé des Canadiens. Certains écologistes à orientation théologique, par exemple, ont avancé une vision holistique de la santé humaine et de la santé des écosystèmes, reconnaissant que cette dernière joue un rôle essentiel en nourrissant nos existences sur les plans physique, émotionnel, esthétique, moral et religieux (Berry, 1998, p. 81). Même s'il est difficile, voire impossible, d'attribuer une valeur à ces effets non tangibles, ni de définir leurs interactions, ce point de vue illustre à quel point nous évaluons les effets de façon subjective. En conséquence, la valeur d'ensemble des avantages connexes risque d'être beaucoup plus élevée que si elle était mesurée de manière classique.

Foresterie

Au cours d'une récente évaluation des forêts canadiennes (Hall *et al.*, 1997), il a été conclu que les dépôts acides, particulièrement à des concentrations excédant les charges critiques, continuent à être très nocifs pour la santé des forêts canadiennes. Si les dépôts acides continuent à dépasser les charges critiques, la durabilité des forêts ontariennes sera gravement menacée, ainsi que celle de grandes portions de forêts d'intérêt commercial du Québec, de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick. Actuellement, aucune valeur monétaire fiable n'a été estimée quant aux avantages de la réduction des dépôts acides pour le secteur forestier canadien (GTEA, 1997). Les avantages seraient à tout le moins comparables aux baisses évitées de productivité des forêts, que l'on chiffre généralement à 10 %. Si des avantages supplémentaires étaient également pris en considération, comme la production de sirop d'érable, l'écotourisme et les loisirs, la valeur des avantages augmenterait d'autant. Les forêts canadiennes ont également une valeur écologique importante, car elles fournissent un habitat à la faune et jouent un rôle capital dans le cycle du carbone du système climatique planétaire.

Ces estimations ne tiennent pas compte non plus des avantages connexes qui peuvent découler d'une réduction d'autres polluants dont les effets nocifs sur les forêts ont été bien documentés ailleurs dans la littérature. Par exemple, une exposition accrue à O_3 pourrait avoir des répercussions importantes à long terme sur la capacité des arbres à se protéger contre les maladies et les attaques des insectes (Kelly *et al.*, 1993). En outre, il a été montré que O_3, combiné à des concentrations toujours plus importantes de SO_2, fait baisser de façon importante la photosynthèse chez l'épinette et le sapin (Schweizer et Arndt, 1990), tandis que l'ajout des dépôts acides à cet ensemble de stress augmente la sensibilité au gel ainsi que les blessures qui en découlent (Chappelka et Freer-Smith, 1995). La réduction des émissions de NO_X et de COV (précurseurs de O_3) accroîtrait la valeur des avantages connexes au-delà de ceux uniquement attribués à la réduction des dépôts acides.

Agriculture

À l'opposé de la foresterie, les recherches ont montré que l'agriculture est beaucoup plus sensible à O_3 qu'aux dépôts acides. L'exposition prolongée à O_3 peut causer d'importants troubles cellulaires mettant en jeu des changements des caractéristiques à la fois fonctionnelles et structurelles des végétaux. De nombreux effets peuvent survenir, comme des maladies foliaires, une modification de l'allocation des hydrates de carbone, la réduction de la croissance et du rendement, ainsi que des répercussions sur les associations végétales et le fonctionnement des écosystèmes (CCRS, 1990). Les effets sont habituellement mesurés en termes de changements dans la photosynthèse, la conductance des feuilles, l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la surface foliaire, le poids volumique de la feuille, le poids de la récolte à la maturité, la floraison, la production de matière sèche et son rendement, ainsi que la sensibilité au stress de sécheresse et au stress minéral (Krupa et Kickert, 1993). Au Canada, plusieurs études ont tenté d'évaluer la réaction par blessure foliaire aux conditions de O_3 ambiant, principalement en Colombie-Britannique, en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick.

Même si aucun indice d'exposition ni statistique relative aux doses ne s'applique à toutes les cultures, certaines recherches sur la relation entre la réaction des cultures et l'exposition à O_3 soulignent l'importance des concentrations de pointe et des indices d'exposition cumulatifs pondérés (Programme scientifique multipartite sur les NO_X et les COV, 1997; CCRS, 1990). D'après les conclusions du National Crop Loss Assessment Network (NCLAN) de la U.S. Environmental Protection Agency, on peut observer des effets sur la croissance et le rendement de plusieurs espèces végétales lorsque les concentrations moyennes de O_3 dépassent 50 ppb durant une période de quatre à six heures par jour, pendant au moins deux semaines (Pearson, 1997). Parmi les espèces et les cultivars évalués, au moins 50 % devaient subir une perte de rendement de 10 % à des concentrations moyennes saisonnières de O_3 de 50 ppb durant sept heures.

Le NCLAN a calculé que les moyennes saisonnières équivalentes ou inférieures à 35 ppb constituent le seuil minimal généralement accepté d'effet sur le rendement. L'atteinte de cette norme, toutefois, n'offrirait pas de protection complète à long terme pour toutes les cultures sensibles (CCRS, 1990; Programme scientifique multipartite sur les NO_X et les COV, 1997). Néanmoins, elle éviterait probablement d'importants dommages aux cultures, étant donné que de nombreux sites de surveillance dans des régions rurales de l'Ontario ont enregistré jusqu'à 170 dépassements du seuil horaire de 80 ppb durant les années où l'exposition à O_3 était la plus élevée (p. ex., été 1998). Pearson (1989) a estimé que la valeur de la productivité accrue découlant de l'atteinte de cette norme pour 19 cultures agricoles et ornementales en Ontario se situait entre 17 et 70 millions de dollars par année. Les cultures les plus à risque sont le haricot sec, la pomme de terre, l'oignon, le foin, le navet, le blé d'automne, le soja, l'épinard, le haricot vert, le tabac jaune, la tomate et le maïs sucré. Les cultures légèrement à risque sont le concombre, la courge, la citrouille, le melon, le raisin, le tabac Burley et la betterave. En comparaison, il n'existe actuellement aucun risque reconnu pour les cultures sensibles de l'Alberta, tandis que, dans la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique, les pertes dues à O_3 se sont élevées, selon les estimations, à 9 millions de dollars (CCRS, 1990). Aux États-Unis, on a estimé que les pertes agricoles dues à O_3 variaient entre un et trois milliards de dollars par année (Hale *et al.*, 1997).

Même si, en fin de compte, les effets sont déterminés par les concentrations de polluants et la sensibilité des milieux exposés, les effets de O_3 sur les cultures agricoles canadiennes peuvent être plus importants que prévu. Krupa et

Kickert (1993) ont relevé un certain nombre d'autres cultures qui sont sensibles à des concentrations accrues d'O_3, notamment le pois, l'avoine, la laitue, la luzerne, le radis, le trèfle, le chou et l'œillet. Même si Runeckles (1984) affirme qu'on a assez d'indications de l'existence d'effets synergiques de SO_2 + NO_2, et de SO_2 + O_3 qui affectent gravement la culture de nombreuses espèces, les études sur le terrain n'avaient toujours pas indiqué, en 1990, d'effets interactifs importants entre les dépôts acides et O_3 (CCRS, 1990). Les expériences menées sur le terrain n'ont pas pu, elles non plus, prouver que l'acidité des pluies réduisait le rendement des cultures.

Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence, et s'accompagnent de mises en garde :

- les études des relations dose-réponse n'ont été menées que sur un nombre restreint de cultures, comme le soja, le haricot (mange-tout), le trèfle, le maïs, l'avoine, la pomme de terre, le radis, le ray-grass et le tabac;
- pour la plupart des cultures étudiées, les expériences de dépistage visant à déterminer la sensibilité des espèces à l'acidité des pluies n'ont été menées que sur un ou deux cultivars;
- certaines études ont montré que la réaction de la plante peut être fonction non seulement de l'espèce, mais aussi fortement du cultivar;
- certains groupes de cultures vivaces, comme les arbres fruitiers et les plantes fourragères, n'ont pas été examinés de façon adéquate (CCRS, 1990; p. 56).

Il est généralement reconnu que les conditions environnementales, comme la sécheresse, peuvent favoriser une plus forte réaction aux dépôts acides chez la plante. Qui plus est, on connaît peu les effets à long terme des dépôts acides sur le cycle des oligo-éléments et sur leur disponibilité pour les plantes dans les sols agricoles. D'autre part, la plupart des sols agricoles canadiens ont un pouvoir tampon relativement élevé, et les pratiques agricoles modernes, qui intègrent des stratégies d'adaptation efficaces, peuvent aider les producteurs agricoles à surmonter nombre des effets négatifs des dépôts (CCRS, 1990).

Il est également bien connu que les UV-B nuisent à la croissance de nombreuses cultures, même si les recherches portant sur les effets d'interaction avec O_3 ont produit des résultats assez variés. Cela est en partie dû au fait que les concentrations élevées d'O_3 peuvent, en fait, atténuer l'intensité des UV-B en surface, peut-être jusqu'à 10 % dans les régions industrialisées. Néanmoins, l'information portant sur les interactions biotiques mettant en jeu les UV-B et O_3 tend à être très fragmentée, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour que l'on puisse comprendre parfaitement les effets additifs, synergiques ou antagonistes de multiples stress atmosphériques. Les effets des UV-B, par exemple, pourraient être si importants qu'ils arriveraient en fait à annuler l'effet bénéfique de concentrations élevées de CO_2, occasionnant une baisse globale de la croissance des plantes (van de Staaij *et al.*, 1993).

Les interactions avec le climat sont également importantes. Même l'effet global net des changements climatiques sur l'agriculture canadienne peut être positif, étant donné la capacité des producteurs agricoles à s'adapter à la situation, il est possible que de nombreux facteurs climatiques aient des répercussions négatives sur la production des cultures (Brklacich *et al.*, 1997). Ces répercussions comprennent les changements de la température, des précipitations, de l'humidité du sous-sol, des unités thermiques disponibles, de la durée de la saison de croissance ainsi que de la fréquence, la gravité et la durée des événements extrêmes. La façon dont les autres agresseurs atmosphériques interagiraient dans un nouveau climat n'est pas clairement définie, même si l'effet de la sécheresse sur la réaction des plantes aux dépôts acides laisse entendre que les effets interactifs négatifs pourraient être importants.

5.2 Bien-être collectif

Il existe différentes façons de définir le bien-être collectif. Cependant, on le définit généralement en termes des conditions sociales, culturelles et économiques qui touchent les personnes, les familles et les collectivités. La British Medical Association (1998) fournit une description utile des facteurs qui sous-tendent et déterminent le bien-être collectif. Ce sont des objets possédant une valeur sociale intrinsèque; des facteurs sociaux qui, rassemblés, déterminent notre qualité de vie; des biens naturels, comme la beauté de la nature, des vues et des routes panoramiques; des

biens historiques et patrimoniaux; des biens culturels et religieux; des biens esthétiques. Dans le contexte des avantages connexes, les valeurs collectives peuvent être mesurées par la mesure dans laquelle les conditions atmosphériques affectent la satisfaction que les Canadiens retirent de ces biens naturels, collectifs et culturels. Toutefois, les évaluations des conditions atmosphériques tendent à se concentrer sur un ensemble restreint et sélectif d'indicateurs du bien-être collectif et n'intègrent habituellement que ceux qui peuvent être évalués le plus facilement.

Les stress atmosphériques peuvent avoir des effets à la fois directs et indirects sur le bien-être collectif. Les dépôts acides sont un bon exemple d'effets directs et cumulatifs, car ils peuvent nuire à l'environnement urbain en endommageant des immeubles, des ponts, des monuments historiques et d'autres structures. Ces effets directs peuvent être vastes (corrosion accélérée des métaux, dégradation du calcaire et du grès). Même si les coûts rattachés à ces effets n'ont pas été évalués au Canada, il a été estimé, dans certaines études préliminaires effectuées en Europe, que la valeur économique des dommages aux bâtiments causés par la pollution atmosphérique s'élève approximativement à plusieurs centaines de dollars par tonne de SO_2 émis (GTEA, 1997).

La qualité de l'air a également un effet indirect sur le bien-être collectif en nuisant à la visibilité des biens naturels et culturels. Il existe six types de particules primaires qui influent sur la visibilité : sulfates, nitrates, carbone élémentaire, carbone organique, particules fines et grosses particules (Austin *et al.*, 1998). Habituellement mesurée en unités deciview, la visibilité est aussi perçue comme un indicateur de la qualité de l'air et, en tant que tel, représente un marqueur important dont se servent les Canadiens pour mesurer leur qualité de vie (GTEA, 1997). L'établissement d'une valeur pour la visibilité constitue toutefois un exercice subjectif et difficile, car il met en jeu des valeurs d'usage et de non-usage. Comme le fait remarquer le GTEA (1997), la façon dont les Canadiens ressentent le fait de voir des montagnes clairement ou, encore, une brume brunâtre suspendue au-dessus d'une ville relève de l'esthétisme et n'est pas bien mesurée par les économistes. Même l'Arctique, qui est une région écosensible, n'est pas immunisé contre la brume sèche, les basses températures et l'absence de précipitations faisant que la pollution transportée sur de longues distances (principalement de la Russie et de l'Europe et, dans une moindre mesure, de l'Amérique du Nord, de la Chine et du Japon) reste emprisonnée pendant des semaines dans l'atmosphère. La brume sèche de l'Arctique a connu une hausse soudaine (75 %) depuis 1956; en 1989, on estimait qu'elle couvrait une zone d'environ 800 à 1 300 kilomètres de diamètre (Environnement Canada, 1989). Même si la visibilité de quatre sites canadiens fait actuellement l'objet d'une surveillance (Environnement Canada, 1997a), il n'est fait aucune mention d'une amélioration ou d'une détérioration de cette visibilité dans le Rapport d'évaluation de 1997 sur les pluies acides au Canada.

Certaines études préliminaires menées aux É.-U. donnent cependant quelques indications concernant les valeurs à la fois absolues et relatives des avantages connexes d'une visibilité accrue. Dans leur analyse des avantages connexes de la réduction des émissions de polluants atmosphériques au Maryland, Austin *et al.* (1998) ont calculé que la valeur de la visibilité récréative (à partir d'un parc national) s'élevait à 21 millions de dollars, tandis que la visibilité résidentielle (d'après des vues de Washington, D.C.) valait beaucoup moins, à savoir 1,2 million de dollars. Lorsqu'on les compare aux avantages pour la santé humaine, qui sont estimés à 700 millions de dollars dans la même étude, les effets sur la santé humaine sont clairement supérieurs à ceux relatifs à la visibilité, et de nombreux ordres de grandeur. On a calculé que les avantages valaient respectivement 116,80 $, 5,60 $ et entre 1,60 $ et 2,00 $ par personne pour la mortalité humaine, la morbidité humaine et la visibilité. Abt (1998) a calculé, pour la santé humaine, des importances relatives similaires en rapport avec la visibilité.

5.3 Santé humaine

La présente section présente les répercussions d'une meilleure qualité de l'air sur la mortalité et la morbidité, notamment des projections relatives à la réduction des effets découlant de celle des concentrations de polluants critères, lesquels ont été traités de plus près dans des études canadiennes. Tandis que la qualité de l'air a retenu le gros de l'attention dans la littérature, on connaît moins les avantages et les coûts pour la santé humaine liés aux substances toxiques et autres polluants atmosphériques.

Qualité de l'air et santé humaine

On sait depuis longtemps que la combustion de combustibles fossiles émet des polluants atmosphériques dangereux pour la santé humaine. Même si des normes relativement strictes ont permis, au Canada et aux États-Unis, d'améliorer la qualité de l'air, certaines recherches indiquent toujours l'existence d'un lien entre la qualité de l'air ambiant et plusieurs effets négatifs sur la santé humaine, même aux concentrations actuelles. À l'origine, les recherches et les politiques de réduction ciblaient le SO_2, mais le centre d'intérêt s'est déplacé, au cours de la dernière décennie, vers les polluants gazeux et les particules. Certaines études récentes révèlent l'existence d'un lien relativement fort entre les grosses particules (PM_{10}), les particules fines ($PM_{2,5}$) et certains effets négatifs sur la santé humaine (GTEA, 1997; USEPA, 1997b).

Par rapport aux autres effets et conséquences, les répercussions de la qualité de l'air sur la santé humaine ont fait l'objet d'un examen approfondi dans la littérature (Lang *et al.*, 1996; Liu, 1997; Wilby *et al.*, 1997). En général, il existe trois types d'études sur la santé :

1. les études épidémiologiques, qui évaluent les relations statistiques entre l'exposition à la pollution atmosphérique ambiante et les effets sur la santé de la population humaine;

2. les études cliniques chez les humains, pour desquelles on expose des sujets à des concentrations restreintes de pollution atmosphérique dans un environnement soigneusement contrôlé et surveillé en laboratoire;

3. les études toxicologiques, qui exposent directement des tissus animaux ou humains à des polluants atmosphériques et en mesurent les effets.

La plupart des études qui évaluent les effets sur la santé de vastes groupes de population tendent à reposer sur la recherche épidémiologique.

En 1985, l'American Thoracic Society a présenté le concept de la pyramide pour mesurer les effets de la pollution atmosphérique sur la santé (figure 5.1). Démontrant les effets en cascade de la pollution atmosphérique, la mortalité se situe au sommet, tandis que les résultats moins graves et plus courants s'inscrivent progressivement dans les niveaux inférieurs de la pyramide. De nombreuses données indiquent, dans la littérature, que les effets sur la santé humaine des principaux polluants atmosphériques, comme le SO_2, l'O_3 et les particules, forment aussi une pyramide.

Figure 5.1 Pyramide des effets de la pollution atmosphérique sur la santé (Love *et al.*, 1998)

Il est difficile de fournir une description définitive des effets sur la santé en raison des nombreuses incertitudes et des lacunes de la littérature. Néanmoins, certaines relations généralement acceptées peuvent être relevées. D'après Love *et al.*, (1998), tout indique :

- que la mortalité prématurée est systématiquement associée à l'exposition à de la pollution par les particules inhalables (PM_{10}) et respirables ($PM_{2,5}$), particulièrement les sulfates; souvent, au SO_2; enfin, dans certaines études, au NO_2 et au CO;

- qu'on compte des hospitalisations pour des maladies cardiaques ou respiratoires pour tous les principaux polluants émis ou produits par la combustion de combustibles fossiles;

- que, pour O_3, les particules fines (particulièrement les sulfates) et peut-être SO_2, rien n'indique l'existence d'un seuil lié aux effets de ces polluants sur l'ensemble de la population;

- qu'il est possible d'estimer quantitativement le fardeau que représentent les maladies dont souffre une population donnée, en fonction de la concentration de polluants dans l'air ambiant à laquelle elle est exposée.

Les polluants secondaires, qui sont formés lorsque des émissions acides (comme les oxydes de soufre et d'azote) et des COV sont chimiquement transformés en sulfates, en nitrates et en aérosols organiques, sont particulièrement nocifs. De taille très petite, ils peuvent être liquides ou solides et sont de nature acide. En raison de leur faible taille (souvent moins de un micromètre) et de leur réactivité chimique, ils peuvent pénétrer profondément dans les poumons et altérer des tissus délicats. Dans une étude exhaustive portant sur des villes américaines, Pope *et al.* (1995) ont découvert que la pollution atmosphérique causée par les sulfates et les particules fines entraînait une différence de 15 à 17 % des risques de mortalité entre les villes les plus polluées et celles qui le sont le moins. Il ressort également de cette étude que les effets chroniques cumulatifs peuvent être pires que les effets aigus à court terme.

Selon une recherche récente portant sur le lien entre les maladies respiratoires et cardiaques et la pollution atmosphérique dans des villes du Canada, les effets synergiques peuvent être plus importants que ce que l'on croyait autrefois (Burnett *et al.*, 1997; Rapport du groupe d'experts sur les effets sur la santé et l'environnement, 1997; Burnett *et al.*, 1998). Dans ces études, on a découvert que la pollution de l'air ambiant avait un effet plus important sur la santé humaine que les PM_{10} et même les $PM_{2,5}$. Parmi les polluants critères, il s'est avéré que NO_2 était celui qui influait le plus sur la mortalité (risque accru de 4,1 %), suivi par O_3 (1,8 %), SO_2 (1,4 %) et CO (0,9 %). Puisque NO_2 n'est pas largement reconnu comme un facteur de risque, comparativement à d'autres polluants critères des villes d'Amérique du Nord, ces conclusions semblent indiquer que les décideurs doivent adopter une vision plus vaste et globale des polluants atmosphériques. Comme le font remarquer Burnett *et al.* (1997) :

> Il se pourrait qu'on sous-estime les avantages pour la santé publique des stratégies de réduction de la pollution atmosphérique, qui visent à réduire les émissions primaires de polluants gazeux de façon à restreindre la formation d'aérosols composés de particules secondaires, si tous les avantages ne sont attribués qu'à la réduction de la masse de particules (p. 620).

Projections des avantages

Pour estimer les avantages potentiels pour la santé humaine au Canada découlant de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, il est utile d'examiner d'abord l'étude menée par le groupe de travail sur la santé publique et l'utilisation de combustibles fossiles (Lee Davis *et al.*, 1997). Dans cette étude, les estimations des avantages connexes pour la santé humaine sont calculées à l'échelle mondiale. Exprimées en termes de décès prématurés évités, les estimations reposent sur une politique hypothétique relative au climat qui exigerait une réduction de 15 et de 10 % des émissions de GES d'ici 2010, pour les pays développés et les pays en développement respectivement. Les particules sont considérées comme le polluant atmosphérique indicateur, les émissions et les concentrations (à la fois des particules grosses et fines) étant prises en compte. En une vingtaine d'années, un peu plus de 700 000 décès prématurés seraient évités chaque année si les réductions ci-dessus étaient atteintes. De ces décès, 138 000 auraient été évités dans les pays développés. Pour les États-Unis, on estime qu'au moins 33 000 décès par année pourraient être évités d'ici 2020, ce qui se compare aux décès actuellement causés par l'immunodéficience humaine et les affections hépatiques aiguës.

L'étude ne donne pas de données pour le Canada en particulier. Néanmoins, on pourrait produire une estimation proportionnelle fondée sur les différences qui s'appliquent actuellement à la population totale. Avec un rapport de 1/10, on pourrait rapidement estimer à 3 300 le nombre de décès prématurés qui seraient évités au Canada. Toutefois, cette estimation comporte de nombreuses incertitudes, et le nombre de décès évités sera probablement très différent. D'une part, l'étude ne traite que des particules et ne tient pas compte de l'éventail complet des polluants critères, comme NO_2, SO_2, O_3 et CO. Qui plus est, l'étude ne tient pas compte de la morbidité, ni de tous les groupes d'âges dans les estimations relatives à la mortalité. En conséquence, les estimations peuvent être considérées comme prudentes, et la valeur réelle des avantages sera plus élevée. D'autre part, les réductions projetées des émissions sont quelque peu plus élevées que celles convenues aux termes du Protocole de Kyoto; on peut donc s'attendre à ce que les réductions des effets négatifs soient moindres que celles projetées dans l'étude.

Malgré ces incertitudes et d'autres, les données de la littérature indiquent que les avantages pour la santé humaines pourraient être importants au Canada si la réduction des émissions de GES entraînait des améliorations relatives à la

Tableau 5.1 Scénarios relatifs à la réduction des concentrations de SO_2

Avantages estimés, pour toutes les provinces, de réductions des émissions de 25, 50 et 75 % (totaux non actualisés pour 2010-2025).

Estimation centrale : en milliers de dollars canadiens de 1994

Scénario	Mortalité	Cas de maladies respiratoires obstructives	Hospitalisations (maladies respiratoires)	Hospitalisations (maladies cardiaques)	Visites à l'urgence	Jours de symptômes d'asthme	Jours d'activités restreintes	Jours de symptômes de maladies respiratoires aiguës	Cas de bronchite chez les enfants	Souillure des matériaux domestiques	Totaux
Réduction des émissions de 25 %	12 978 965	3 292 648	13 233	13 730	5 421	60 604	130 654	602 819	55 313	139 559	17 292 856
Réduction des émissions de 50 %	35 271 136	8 944 406	35 963	37 311	14 731	164 695	354 619	1 638 250	150 544	379 260	46 990 916
Réduction des émissions de 75 %	53 210 806	13 492 637	54 254	56 289	22 223	248 463	534 974	2 471 503	227 128	572 160	70 890 436

Estimation centrale : événements évités

Scénario	Mortalité	Cas de maladies respiratoires obstructives	Hospitalisations (maladies respiratoires)	Hospitalisations (maladies cardiaques)	Visites à l'urgence	Jours de symptômes d'asthme	Jours d'activités restreintes	Jours de symptômes de maladies respiratoires aiguës	Cas de bronchite chez les enfants
Réduction des émissions de 25 %	3 245	11 315	2 036	1 654	9 034	1 236 819	1 764 383	430 581 759	153 646
Réduction des émissions de 50 %	8 818	30 737	5 533	4 495	24 551	3 361 132	4 792 155	117 017 835	418 178
Réduction des émissions de 75 %	13 303	46 366	8 347	6 782	37 039	5 070 677	7 229 383	176 535 894	630 911

Source : adaptation des tableaux 6, 7 et 9, GTEA (1997)

Tableau 5.2 Pour toutes les provinces, avantages liés à une réduction des émissions de 50 % au Canada seulement (totaux non actualisés pour 2010-2025).

	Mortalité	Cas de maladies respira-toires obstructives	Hospitali-sations (maladies respira-toires)	Hospitali-sations (maladies cardiaques)	Visites à l'urgence	Jours de symp-tômes d'asthme	Jours d'activités restreintes	Jours de symptômes de maladies respira-toires aiguës	Cas de bronchite chez les enfants	Souillure des matériaux domestiques	Totaux
Estimation centrale : en milliers de dollars canadiens de 1994	890 057	226 625	908	942	372	4 156	8 981	41 332	3 761	9 571	1 186 704
Estimation centrale : événe-ments évités	3 328	11 649	2 088	1 697	9 267	1 268 639	1 815 428	44 158 258	156 256	N/A	N/A

Source : adaptation du tableau 8, GTEA (1997)

qualité de l'air et aux dépôts acides. La présente recherche fournit des projections des effets sur la santé qui seraient évités grâce à une réduction des polluants atmosphériques rejetés par le secteur des transports, principalement par la réduction de la teneur en soufre de l'essence et du carburant diesel (CCME, 1995; Rapport du groupe d'experts sur les effets sur la santé et l'environnement, 1997), des dépôts acides (GTEA, 1997) et des NO_X/COV (ministère de l'Environnement et de l'Énergie de l'Ontario, 1996). Les avantages relevés dans l'étude du GTEA (1997) sont résumés dans le tableau 5.1; ils indiquent qu'une meilleure qualité de l'air et la réduction des dépôts acides pourraient améliorer de façon importante la santé des Canadiens. Des effets similaires pour la santé humaine ont été liés à la réduction des émissions des centrales au charbon (Love *et al.*, 1998), ce qui soulève la question de la pollution transfrontalière et de l'importance de la réduction des émissions aux États-Unis pour l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine dans tout l'est du Canada (Chesnut, 1995). Les avantages pour la santé humaine d'une réduction des émissions de 50 % pourraient être 40 fois supérieurs si les États-Unis unissaient leurs efforts à ceux du Canada.

Tandis que les évaluations de la teneur en soufre de l'essence et du carburant diesel tiennent compte des effets du benzène, qui est un cancérogène bien connu, peu d'études examinent les effets des substances toxiques. Cela soulève la question des polluants atmosphériques dangereux et des substances toxiques émis dans l'atmosphère et de leurs effets nocifs sur l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine. L'émission de nombreux contaminants toxiques peut être directement attribuée à la combustion de combustibles fossiles (Santé Canada, 1998). La production d'électricité au moyen de combustibles fossiles, par exemple, émet un vaste éventail de substances toxiques, dont un grand nombre figurent dans la Liste des substances d'intérêt prioritaire (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 Certaines substances toxiques probablement émises par le secteur de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles.

- arsenic inorganique,
- cadmium inorganique
- composés de chrome hexavalent
- fluorures inorganiques
- composés du nickel
- mercure
- hydrocarbures aromatiques polycycliques
- benzène
- dibenzodioxines/dibenzofuranes
- trichloréthylène
- plomb
- dichlorométhane

Source: Environnement Canada (1997b)

On n'a pas encore estimé les effets sur la santé et la valeur des avantages en regard de la réduction des émissions de substances toxiques; toutefois, l'inclusion de ces estimations accroîtrait à coup sûr l'importance des avantages connexes. Dans un rapport récent, il a été estimé que l'utilisation du gaz naturel au lieu de charbon pour produire de l'électricité entraînerait des avantages considérables pour la santé humaine (Diener Consulting & Acres International, 1998). Une réduction de 83 % des émissions de SO_2 dans le secteur de l'électricité réduirait également d'une quantité équivalente les concentrations d'autres polluants atmosphériques toxiques émis par des centrales au charbon. On compte parmi ces polluants l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb et le mercure, lesquels peuvent, dans certains cas, être neurotoxiques ou cancérogènes. Même si les contributions globales de ces émissions (pourcentages des totaux nationaux) tendent à varier, la réduction potentielle des émissions directement attribuable au remplacement des centrales au charbon est considérable.

En dernier lieu, même si de nombreux effets indirects peuvent résulter de la réduction des émissions de GES, la plupart des évaluations tendent à ne pas en tenir compte. Des effets indirects peuvent toucher les eaux souterraines, les sols et la chaîne alimentaire, influant ainsi sur les écosystèmes, l'environnement et, en fin de compte, la santé humaine. Peu de documents, si ce n'est aucun, évaluent ces

effets de manière exhaustive. On en discute habituellement, le cas échéant, de manière qualitative, avec peu d'indications sur leur importance relative. Les dépôts acides, par exemple, peuvent acidifier les eaux et les sols, occasionnant une mobilisation des métaux lourds, comme le cadmium, le mercure, le plomb, l'arsenic et l'aluminium (Liu, 1997). En conséquence, l'exposition humaine accrue à ces métaux a lieu par l'entremise de l'eau et de la chaîne alimentaire. Ce que l'on connaît moins est la valeur monétaire associée à la réduction du risque d'exposition à ces polluants.

5.4 Facteurs externes

La grande majorité des recherches sont concentrées sur les effets pouvant être attribués plus directement aux émissions; toutefois, de nombreuses activités humaines entraînant des réductions de l'utilisation des combustibles fossiles peuvent également avoir une incidence et des effets supplémentaires sur l'environnement naturel et humain. Ces « facteurs externes » touchent des points non ciblés par une politique ou un projet particulier. Dans la littérature qui évalue les répercussions, les émissions de polluants atmosphériques, leurs incidences et leurs effets sont traités comme un seul (bien qu'il soit important) des nombreux facteurs externes associés aux activités humaines, comme la production et le transport de l'électricité. Bein (1997) propose, en citant comme exemple l'incidence des routes sur l'environnement, que ces dernières peuvent contribuer à la pollution atmosphérique, causer du bruit et des vibrations, nuire à l'utilisation des terres, consommer des ressources, créer des problèmes d'élimination des déchets, contribuer à la pollution de l'eau, affecter l'hydrologie, constituer des obstacles pour les gens, les espèces sauvages et les activités agricoles, et diminuer la biodiversité.

À ce titre, les avantages connexes forment un sous-ensemble de facteurs externes même si, dans notre cadre d'évaluation, ces derniers désignent les incidences et les effets non directement liés aux émissions, à la qualité de l'air et à d'autres questions atmosphériques. Selon l'activité humaine considérée, les mesures prises pour réduire les émissions de GES peuvent engendrer une vaste gamme d'avantages et de coûts qui ne sont pas directement imputables à la réduction des concentrations de polluants atmosphériques. Par exemple, le transport engendre d'énormes coûts indirects : que l'on pense au nombre d'installations prévues pour la circulation et au nombre d'accidents qui surviennent au Canada chaque année. Même certaines solutions de rechange aux combustibles fossiles, comme la production d'électricité dans des centrales hydroélectriques et nucléaires, ont une incidence non liée à l'émission de polluants et ont des effets sur l'environnement naturel et humain.

Il n'est pas surprenant qu'il soit difficile d'estimer la valeur monétaire de cette incidence et de ces effets et, même lorsqu'on s'y attaque dans la littérature, de nombreuses incertitudes restent. Les études prennent en compte des « cycles de vie » de durées variables, tandis que les incidences locales sont souvent fonction des situations propres à un endroit donné et de la technologie accessible. Comme il a été démontré dans les discussions portant sur les effets directement liés à la réduction des émissions, le risque que représentent les facteurs externes pour l'environnement peut également être modifié par la durée d'exposition (court, moyen ou long terme) et la portée spatiale des effets (locale, régionale ou mondiale). Néanmoins, il est important d'inclure ces incidences et ces effets « externes » supplémentaires dans l'évaluation des avantages connexes, puisque les coûts et les avantages qui leur sont associés équivalent souvent, et parfois dépassent, ceux directement imputables aux émissions. Bien entendu, la prise de mesures pour réduire les émissions de GES n'entraînerait pas une réduction de tous ces coûts. Cependant, selon les mesures prises et les conditions locales, les incidences et les effets pourraient être importants. Les courtes études de cas ci-après, qui concernent l'électricité, les transports et l'efficacité énergétique des résidences, illustrent la complexité de l'évaluation des effets non liés à des émissions, les possibilités qu'ils représentent ainsi que leur importance relative par rapport à l'estimation globale des avantages connexes.

Électricité

L'électricité est parfaitement propre pour l'utilisateur final, mais on a mentionné plus haut que sa production à partir de combustibles fossiles entraînait certains effets négatifs. Les effets, toutefois, ne sont pas tous imputables aux émissions engendrées pendant la production. Si l'on considère le cycle de vie de l'énergie, la comptabilisation de tous les effets comprendrait tous les impacts potentiels de chaque étape du système énergétique et du cycle du combustible, qui pourraient être importants et varier considérablement à l'intérieur des groupes énergétiques et entre eux (Ottinger *et al.*, 1991; International Expert Group 3, 1991). Le cycle de vie

tient compte du risque de décès, de maladies et de blessures, chez les travailleurs (santé au travail) et le public, causés par des activités liées à l'extraction du combustible (extraction même, forage et prélèvement), la construction, le transport, le traitement, l'entreposage, l'utilisation ou la transformation (dont la gestion des déchets), ainsi que le déclassement des centrales. Même l'énergie hydroélectrique aura des incidences et des effets sur la santé des humains et de l'environnement. Par rapport à l'électricité produite à partir de combustibles fossiles, l'hydroélectricité présente l'avantage de ne pas produire de polluants atmosphériques ou de gaz à effet de serre, à l'exception de ceux créés durant la préparation des matériaux et la construction de l'installation. Comme le soulignent Ottinger *et al.* (1991), les incidences environnementales résultent : i) des modifications apportées aux caractéristiques de débit des cours d'eau; ii) des modifications apportées aux écosystèmes des terres inondées pour créer des réservoirs; iii) de l'érection d'obstacles qui nuisent aux déplacements naturels des poissons et de la faune.

Même si l'évaluation comparative des risques de différents systèmes énergétiques doit être traitée avec une extrême prudence, certaines tendances générales se dégagent de la littérature. Les taux d'accidents relativement élevés liés au groupe des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représentent le risque professionnel le plus important; de plus, leur combustion produit des quantités relativement importantes de déchets solides et gazeux qui, eux, dominent les risques pour la santé publique. Le groupe des énergies renouvelables (éolienne, solaire et thermique) présente un faible risque pour le public et un risque professionnel relativement élevé durant l'étape de la construction des installations. À l'opposé, le groupe des énergies nucléaires présente certains risques professionnels, dont les plus importants sont les accidents liés à l'extraction et à la production d'énergie. Le risque pour le public est assez faible durant les activités normales, mais la gestion à long terme des déchets et la possibilité d'accidents graves ajoutent un risque et une incertitude considérables à cette option. Le coût de la réduction des risques pour la santé durant le déclassement final des installations représente, selon les estimations, de 5 à 100 % des coûts totaux du cycle de vie de la filière nucléaire (Ottinger *et al.*, 1991).

En raison de la complexité de la tâche, il y a eu peu de tentatives pour attribuer des valeurs aux effets de chaque étape du cycle de vie. Krewett *et al.* (1998) ont essayé de le faire pour les effets sur la santé humaine et ont montré que ce sont les combustibles fossiles liquides et solides qui entraînent les pertes les plus élevées du point de vue de l'espérance de vie. Le gaz naturel en cycle combiné est le combustible fossile qui présente le risque le plus faible, et ses effets sont même moindres que ceux attribués à la filière photovoltaïque, car celle-ci a des effets nocifs durant l'approvisionnement en matériaux et l'étape de la production. Néanmoins, il est de plus en plus accepté qu'une combinaison de gaz naturel, d'énergie renouvelable et de mesures de conservation et d'efficacité énergétique offre les options les plus écologiques actuellement disponibles.

Transports

Les transports sont clairement reconnus comme l'une des principales causes de pollution atmosphérique, mais leurs conséquences indirectes sont également considérables. Les blessures et les décès causés par des accidents de la route viennent rapidement à l'esprit, mais les facteurs externes peuvent aussi inclure le bruit indésirable, le rôle important des transports dans l'utilisation et la transformation des terres, la congestion des zones urbaines et l'utilisation des ressources (Greene *et al.*, 1997). Chacun de ces effets a d'autres effets concomitants sur l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine.

Même si ces effets sont difficiles à estimer, on en trouve quelques tentatives dans la littérature (BMA, 1998; Greene *et al.*, 1997; Quinet, 1997; Lakshmanan *et al.*, 1997; Bein, 1997; Osborne Group *et al.*, 1995). Citant une étude de la Commission européenne, Lakshmanan *et al.* (1997) estiment que les coûts externes totaux du transport terrestre peuvent représenter jusqu'à 5 % du PIB, avec la répartition suivante : pollution atmosphérique (à l'exception du réchauffement du globe), 0,4 %; bruit, 0,2 %; accidents, 1,5 %; congestion des zones urbaines, 2,0 %. De façon similaire, la British Medical Association (1998) a estimé que, pour le Royaume-Uni, les coûts environnementaux du transport pouvaient être répartis de la façon suivante (pourcentage du PIB) : pollution atmosphérique, 1,12 % (urbaine), 0,52 % (autre); pollution atmosphérique (effets sur la santé), 1,5 %; bruit, 1,0 %; pollution de l'eau, 1,2 %.

Même si des changements importants concernant les modes de transport (des véhicules à un seul occupant au transport en commun, ou du transport par camion au transport ferroviaire) entraînaient une réduction des coûts moindre que celle des estimations ci-dessus, un grand nombre

d'avantages connexes devraient voir le jour, selon les mesures prises. Toutefois, dans aucune des recherches menées jusqu'ici on n'a tenté d'évaluer le pourcentage des dommages évités grâce à une réduction modérée des émissions de GES dans le secteur des transports. Les évaluations des changements concernant les modes de transport doivent aussi tenir compte des avantages liés à la promotion de modes de transport plus sains, comme la marche et le vélo, dont de nombreux documents vantent les effets positifs sur la santé personnelle et publique. Même si la marche et le vélo comportent leurs propres risques, il a été montré qu'une activité physique accrue réduit le risque de maladies coronariennes et d'accidents vasculaires cérébraux, d'obésité et d'hypertension. Elle constitue en outre un traitement efficace de la dépression et de l'anxiété (BMA, 1998).

Efficacité énergétique des résidences

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur domiciliaire est un bon exemple des avantages et des coûts indirects. Elle démontre également que les mesures prises pour réduire les émissions de GES peuvent être relativement abordables, se répartir sur une grande échelle et produire des avantages externes pouvant dépasser ceux uniquement attribués à la réduction des émissions (et des améliorations qui en découlent pour la qualité de l'air extérieur). En réaction à la crise de l'énergie des années 70, l'efficacité énergétique des résidences et des bâtiments commerciaux s'est accrue de manière importante tout au long de cette décennie et des années 80. Toutefois, en isolant mieux et en prenant d'autres mesures pour réduire la perte de chaleur, on a aussi réduit la ventilation, accroissant ou prolongeant ainsi l'exposition de l'occupant à divers contaminants intérieurs (Ottinger *et al.*, 1991). Durant les années 90, l'amélioration des technologies et des matériaux ont permis de construire des bâtiments efficaces sur le plan énergétique, offrant également un environnement intérieur plus sain. On continue cependant à construire de nouveaux bâtiments qui ne respectent pas les normes de construction relatives aux environnements intérieurs, et le problème persiste dans de nombreux bâtiments domiciliaires et commerciaux.

On a de plus en plus d'indications que la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments construits au cours des années 70 et 80 est responsable, dans une portion importante, de l'exposition du public à la pollution atmosphérique, ce qui peut représenter un risque grave de maladies aiguës et chroniques. En moyenne, les Canadiens passent entre 75 et 90 % de leur temps à l'intérieur (Hancock *et al.*, 1998), et ce, dans des environnement où ils sont exposés à divers polluants, dont des NO_X provenant d'appareils fonctionnant au gaz ou d'appareils de chauffage au mazout qui fonctionnent mal, des composés toxiques provenant des matériaux dont est fabriqué le bâtiment et de textiles domestiques, des COV provenant de photocopieurs et de tapis, en plus des contaminants biologiques (Ottinger *et al.*, 1991; Roberts, 1998). Les enfants sont particulièrement à risque dans les environnements intérieurs (Hancock *et al.*, 1998). La qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique peuvent constituer des objectifs compatibles, et des mesures prises pour les atteindre, au moyen de normes de construction améliorées, peuvent également présenter les avantages connexes supplémentaires d'un accroissement de la tolérance des maisons et des bâtiments à l'incidence des changements climatiques (p. ex., événements extrêmes).

5.5 Conclusions

Il est fort probable que la réduction des émissions de GES aura des effets nombreux et divers. Même si la plupart des avantages qui découlent de ces effets ont été attribués à la santé humaine dans les études des avantages connexes dus à une meilleure qualité de l'air et, surtout, à une exposition réduite aux particules, de nombreuses données semblent indiquer que des avantages importants peuvent apparaître ailleurs. Ces derniers comprennent notamment l'évitement de dommages évités à l'exploitation forestière, à l'agriculture et au bien-être collectif, tandis que, pour la santé humaine, les avantages comprennent l'évitement de maladies et de décès prématurés qui ne sont pas directement imputables à la réduction des concentrations de particules. Si les effets externes non liés aux émissions qui résultent des mesures prises pour réduire les concentrations de GES sont également inclus dans l'évaluation, la valeur globale des avantages pourrait être beaucoup plus élevée que prévu, et ce, de plusieurs ordres de grandeur.

Toutefois, en raison des nombreuses incertitudes et des lacunes de la littérature, l'importance potentielle des avantages demeure incertaine. Tandis que la littérature indique clairement que la réduction des émissions aura des incidences et des effets, on ne possède pas suffisamment de données pour leur octroyer une valeur monétaire. La santé humaine sera toujours au premier plan, mais l'importance relative d'autres effets sera plus grande que celle estimée dans certaines études antérieures.

6.0 IMPORTANCE DE L'ÉCHELLE

La littérature fait largement état de la relation entre les problèmes d'échelle mondiale et les mesures prises à l'échelle locale, en particulier dans la perspective du changement climatique. Cette relation sous-tend l'importance de l'analyse d'échelle régionale pour évaluer les répercussions des changements climatiques, et pour élaborer les mesures d'atténuation appropriées à la réduction des émissions de GES. La relation entre les échelles mondiale, nationale et régionale touche également, sous divers angles, la question des avantages connexes. Nombre de ces points ont été exposés à plusieurs reprises dans le présent document, les analyses d'échelle régionale ayant été jugées très importante dans la plupart des ouvrages qui traitent des avantages connexes. En outre, les analyses à échelle régionale peuvent être particulièrement pertinentes dans le contexte canadien.

Pour choisir une échelle, il convient de prendre en compte les paramètres particuliers du problème étudié. Dans certains cas, il faut choisir une échelle continentale ou mondiale, en particulier pour les problèmes de vaste portée qui nécessitent la signature d'accords entre deux pays ou plus. Cependant, même dans ce cas, des données aux échelles nationale ou régionale peuvent être requises pour qu'on puisse déterminer et formuler la position du Canada sur la scène internationale. Au Canada, les problèmes liés aux impacts des changements climatiques, par exemple, sont systématiquement traités à l'échelon régional; le débat en matière de politiques exige donc un solide ensemble de connaissances à l'échelle régionale (Chiotti, 1998).

Le raisonnement s'applique aussi, sinon plus, à l'évaluation des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES. Il existe, d'abord et avant tout, une relation essentielle entre les échelles mondiale et régionale pour ce qui est des phénomènes atmosphériques et de l'étendue spatiale sur laquelle les avantages d'une réduction des émissions de GES sont susceptibles d'être ressentis. Il a été montré, au chapitre 4, que les problèmes atmosphériques avaient diverses échelles spatiales et temporelles, mais que les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont surtout de nature régionale. Même si certains phénomènes atmosphériques, comme la variabilité et le changement climatiques et l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, ont une portée mondiale, leur interaction avec d'autres problèmes atmosphériques a également une portée régionale. Les effets des d'échelle mondiale seront ressentis pendant de nombreuses décennies, sinon des siècles, et il faudra des années avant que les mesures prises pour réduire les émissions qui causent ces problèmes donnent des résultats perceptibles.

D'autres problèmes atmosphériques, comme les dépôts acides, l'ozone, les particules, les substances toxiques et les HAP, ont tendance à être de nature plus régionale. En particulier, ce sont la météorologie et la géographie locales qui influent sur la distribution temporelle et régionale des émissions et des concentrations des polluants ambiants. La réduction des émissions responsables de ces polluants atmosphériques peut également produire des avantages immédiats et localisés. En outre, la réduction des concentrations de polluants qui contribuent aux problèmes atmosphériques d'échelle régionale aura des avantages d'échelle similaire pour ce qui est de son interaction avec les impacts et les effets des changements climatiques et de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Le GTEA (1997) fait remarquer, au sujet des émissions de SO_2 et des répercussions des dépôts acides, que les avantages de la réduction des émissions sont plus grands dans les régions situées à proximité des pollueurs que dans les régions qui en sont éloignées (p. 20). C'est également le cas des précurseurs de l'ozone, comme les NO_X, les COV et les particules.

Deuxièmement, au Canada, les sources de polluants atmosphériques et les régimes de dépôt ont un caractère hautement régional. Les données de l'Inventaire national des rejets de polluants établissent clairement la nature régionale des variations et des concentrations, pour ce qui est des émissions de divers polluants, notamment les particules, les SO_X, les NO_X, et les COV. À l'exception de l'industrie de l'énergie en Alberta et de certains secteurs de l'économie (p. ex., pâtes et papiers, extraction de métaux non ferreux et fusion), la majeure partie des émissions sont produites dans des régions précises, tandis que d'autres ont tendance à être propres aux régions urbaines. Les principales sources de polluants atmosphériques sont le transport, la production d'électricité et le secteur industriel, sources qui présentent une variabilité spatiale au Canada. Étant donné que l'ampleur des incidences et des effets est étroitement liée aux mesures de réduction des émissions, il s'ensuit que ces mesures doivent être évaluées à l'échelle régionale.

Les émissions provenant de la production d'électricité, par exemple, sont directement liées au type de combustible et

à la combinaison de sources d'énergie; au Canada, la structure régionale de la production est très nette (tableau 6.1). En 1996, les centrales au charbon étaient les principaux producteurs d'électricité et donc les principales sources importantes de polluants atmosphériques en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario, en Nouvelle-Écosse et au Nouveau-Brunswick. Cette situation fait un net contraste avec l'importance relative de l'hydroélectricité au Québec, au Manitoba et en Colombie-Britannique, et de l'énergie nucléaire en Ontario. Dans ce dernier cas, la fermeture prématurée des centrales nucléaires et leur remplacement par des centrales au charbon et au pétrole peuvent aggraver le statut de l'Ontario, qui est déjà le plus important émetteur de polluants atmosphériques.

Troisièmement, la nature même des avantages connexes implique une relation étroite entre les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques, en association avec la collectivité réceptrice.

Dans ce dernier cas, cette relation met en cause soit les répercussions sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, soit les effets sur l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine.Il a été montré, aux chapitres 4 et 5, que les incidences et les effets des dépôts acides et de la qualité de l'air ont un caractère régional, et qu'ils se manifestent particulièrement dans l'est du Canada et les grands centres urbains. Ce phénomène est peut-être le plus apparent pour la santé humaine et la situation géographique des groupes vulnérables, mais il s'applique également aux secteurs de la foresterie et de l'agriculture, particulièrement sensibles à la pollution atmosphérique, ou encore aux régions où les concentrations de polluants sont particulièrement élevées.

Quatrièmement, la question de pollution transfrontalière est un problème important dans certaines régions du pays, mais pas dans d'autres. Elle met en cause, en amont, la pollution provenant des É.-U., et, en aval, la pollution passant d'une région du Canada à une autre. Le sud de l'Ontario, certaines régions du Québec et les provinces Maritimes subissent particulièrement les effets de la pollution transfrontalière, plus précisément en ce qui a trait aux dépôts acides et à l'ozone. La vallée de l'Ohio et les centrales au charbon sont des pollueurs bien connus, à qui l'on impute jusqu'à 50 % de la pollution atmosphérique du sud de l'Ontario (ministère de l'Environnement et de l'Énergie de l'Ontario, 1996). En outre, il a été montré que certains scénarios de réduction des émissions aux É.-U. pouvaient avoir des avantages importants sur la santé humaine en Ontario et

Tableau 6.1 Production de l'électricité (GWh) par type de combustible – 1996

	Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Nucléaire	Hydro	Autre	Total
T.-N.	0	1480	0	0	35 336	0	36 816
Î.-P.-É.	0	6	0	0	0	0	6
N.-É.	7850	788	0	0	1151	187	9976
N.-B.	5474	1246	0	4591	3472	571	15 354
Québec	0	1368	0	5232	163 861	0	170 461
Ontario	18 899	141	5078	77 693	40 945	891	143 647
Manitoba	180	35	32	0	30 865	60	31 172
Sask.	11 225	10	769	0	4386	122	16 512
Alberta	41 518	70	6727	0	2261	1200	51 776
C.-B.	0	145	3315	0	66 300	964	70 724
Yukon	0	139	0	0	361	0	500
T. N.-O.	0	475	102	0	260	0	837
Canada	**85 146**	**5903**	**16 023**	**87 516**	**349 198**	**3995**	**547 781**

Sources: Statistiques annuelles de l'énergie électrique – 1996, Statisticuq Canda, catalogue 57-202, (Juin 1998). Statistiques de l'énergie électrique – septembre 1998. Statistique Canada, catalogue 57-001 (Décembre 1998). Bulletin tremestriel – disponibilité et écoulement d'énergie au Canada – 1997-IV. Statistique Canada, catalogue 57-003, (Octobre 1998).

dans l'est du Canada (Love *et al.*, 1998; Chestnut, 1995). L'étude du GTEA (1997) montre clairement que les mesures prises au sud de la frontière auront des incidences sur le sud de l'Ontario et l'est du Canada.

Cinquièmement, d'autres politiques de réduction de la pollution sont surtout de nature régionale. Alors que la nature transfrontalière des dépôts acides et de la qualité de l'air exige la dimension supplémentaire de la collaboration entre les deux pays, la plupart des décisions en matière de politiques sont propres à la région. C'est particulièrement le cas pour la pollution atmosphérique, diverses politiques municipales et provinciales étant en vigueur pour réduire les émissions. Cela souligne l'importance de situer la réduction des émissions de GES dans le contexte de conditions régionales, particulièrement pour des raisons d'harmonisation. Olivotto (1997) fait remarquer que, pour chaque région où se présente un problème d'ozone, il faudra concevoir différentes stratégies de réduction des émissions. Cette situation est attribuable à des facteurs géographiques et météorologiques, et aux dimensions spatiales et temporelles des sources d'émission. Dans le cas de la réduction de la teneur en soufre des combustibles, par exemple, la vallée du bas Fraser a déjà mis en application des politiques vigoureuses réglementant la teneur en soufre des carburants diesels. Les avantages des réductions de la teneur en soufre peuvent donc être plus grands dans les importantes régions urbaines qui exercent des contrôles moins rigoureux, comme Montréal et Toronto, comparativement à Vancouver (CCME, 1995).

Sixièmement, l'absence de lien entre les échelles nationale, provinciale et régionale pose plus de problèmes dans le contexte de l'évaluation des stratégies de réduction des émissions de GES. MacIver *et al.* (1999) montrent que les données sur les divers problèmes atmosphériques et l'information concernant les incidences sur les écosystèmes et l'environnement se situent à des échelles spatiales différentes. Trop souvent, les concentrations atmosphériques et leurs conséquences et effets sont extrapolés ou ramenés à l'échelle régionale à partir de données nationales ou provinciales. Inévitablement, cette situation entraîne une perte des différences dans les valeurs dans la région et entre les régions, du fait du processus d'agrégation. L'agrégation nationale et provinciale tend à présenter une image plus homogène des émissions, des concentrations atmosphériques, des incidences, des effets, etc., masquant l'hétérogénéité et des interactions plus riches que procure l'analyse à l'échelle régionale. C'est peut-être à l'échelle régionale que l'on peut le mieux analyser les relations synergiques, antagonistes et non linéaires. C'est en particulier le cas pour les régions rurales du sud de l'Ontario, où les mesures de la qualité de l'air particulières aux sites donnent une image très différente de la qualité de l'air entre les milieux urbain et rural, que celle habituellement présentée à l'échelle provinciale (Chiotti et Bain, 1999). Par extension, ces différences subtiles dans la qualité de l'air peuvent avoir de profondes implications pourr les écosystèmes, l'environnement et la santé humaine qui, autrement, passeraient inaperçues dans des analyses à l'échelle provinciale.

En conclusion, il fait peu de doute qu'une évaluation des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES bénéficierait grandement d'analyses d'échelle régionale. D'autres raisons, qui n'ont pas été mentionnées ici, corroborent la valeur d'analyses à l'échelle régionale. Une, en particulier, mérite d'être citée. L'on peut s'attendre à ce que des mesures locales pour réduire les émissions de GES contribueront de façon très importante à l'effort national en vue d'atteindre les engagements pris aux termes du Protocole de Kyoto. En faisant la démonstration de la valeur des avantages connexes au niveau des municipalités, des collectivités et des quartiers, de même que sur le plan personnel (entreprise ou à domicile), on en améliorerait considérablement l'acceptation à l'échelle régionale. L'examen des avantages connexes fournit une occasion de rappeler au public canadien que ce qu'il considère généralement comme un phénomène planétaire et à venir se déroule dans sa vie quotidienne, et aujourd'hui même. Comme le suggèrent la littérature et le présent document, la réduction des émissions de GES devrait être appliquée dans les régions où ses effets seront les plus grands. Et l'analyse à l'échelle régionale facilitera grandement la collecte de cette information.

7.0 PROCHAINES ÉTAPES – PLAN D'ACTION DE LA PHASE II

Le but et les objectifs du présent aperçu ont été de fournir une évaluation qualitative préliminaire de l'importance relative des incidences et des effets des mesures prises pour réduire les émissions de GES. Il en ressort clairement que la question des avantages connexes est vaste et complexe, et qu'elle met en jeu de nombreuses interactions, incertitudes et lacunes des connaissances. Même si nous pouvons comprendre et estimer les incidences et les effets de façon sûre dans certains secteurs, des incertitudes demeurent dans d'autres. Cette situation est due, en partie, à l'état actuel de nos connaissances, aux difficultés inhérentes à ce problème atmosphérique du point de vue de la science et de la recherche, et à notre capacité d'évaluer les incidences et les effets.

La valeur nette des avantages connexes est probablement plus élevée du côté de la santé humaine, même si l'importance relative d'autres effets, sur les écosystèmes et l'environnement par exemple, peut être plus importante que prévu. Dans le cas de la santé humaine, l'élargissement du cadre d'évaluation – pour inclure les polluants gazeux, les substances toxiques et les particules – accroîtrait considérablement la valeur des avantages. Même s'il est peu question de la valeur des incidences sur l'écosystème et des effets sur l'environnement et le bien-être collectif dans la littérature, on peut s'attendre, sur un plan qualitatif, à ce que les répercussions évitées dans ces secteurs soient également importantes. Si l'on ajoute les facteurs externes non liés à des émissions et découlant des mesures prises pour réduire les émissions de GES, les avantages connexes globaux seront plus importants que prévu, peut-être d'un ordre de grandeur. Il faut cependant effectuer des recherches supplémentaires pour vérifier cette hypothèse.

De nombreuses incertitudes et lacunes des connaissances ont été citées tout au long du document et pourraient faire l'objet de nouvelles recherches. Entre autres :

- les incidences des émissions de polluants atmosphériques sur le fonctionnement de l'atmosphère, par rapport aux interactions avec d'autres problèmes atmosphériques (dont les changements climatiques et les UV-B);
- les tendances réelles et projetées des émissions de polluants atmosphériques;
- les interactions entre les problèmes atmosphériques et leurs effets synergiques, antagonistes et cumulatifs sur les écosystèmes terrestres et aquatiques;
- les interactions entre les problèmes atmosphériques et leurs effets synergiques, antagonistes et cumulatifs sur la foresterie et l'agriculture;
- les effets et la valeur des avantages d'une réduction de la pollution atmosphérique pour le bien-être collectif;
- les effets interactifs sur la santé humaine;
- les facteurs externes non liés à des émissions et découlant des mesures prises pour réduire les émissions de GES et leurs effets sur l'environnement, le bien-être collectif et la santé humaine;
- la complémentarité des mesures prises pour réduire les émissions de GES avec les politiques qui visent certains polluants et certains problèmes atmosphériques;
- le niveau des connaissances acquises sur les incidences et les effets à l'échelle régionale.

Étant donné ces incertitudes et ces lacunes, il est possible que même les modèles quantitatifs les plus avancés ne puissent produire des estimations exhaustives parfaitement sûres des avantages connexes. Le fait d'élargir l'évaluation des incidences introduit une incertitude considérable dans le processus, surtout lorsqu'il est question de biens non commerciaux et moins tangibles. Grâce au présent document, nous saisissons maintenant mieux l'importance relative des incidences et des effets, mais nous devons comprendre plus clairement leur importance aux échelles régionale et nationale. Une approche qualitative à l'égard de l'évaluation des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES peut être la méthode la plus pratique et la plus productive pour régler ces incertitudes et ces lacunes des connaissances.

Le présent document est la première étape d'un processus d'amélioration de notre connaissance de l'importance relative des incidences et des effets découlant de la réduction

des émissions de GES au Canada dans une perspective qualitative. Avec le document d'information Changements atmosphériques au Canada : perspective intégrée, il constitue une base pour lancer les prochaines étapes du plan d'action de la phase II. Les deux documents d'information offrent également des évaluations scientifiques utiles, pour aider les tables nationales de concertation à mesurer les incidences et les effets des mesures qu'elles proposent. La rédaction de ces documents a aussi entraîné la formulation d'avis d'experts et l'acquisition de connaissances considérables sur les avantages connexes. Ces connaissances peuvent être transmises aux tables nationales de concertation, au moyen non seulement de l'établissement d'un conseil consultatif et d'un groupe d'experts scientifiques, mais aussi d'une évaluation plus exhaustive des mesures qu'elles proposent, durant la phase de « cumul » des données (de mai à septembre 1999).

Étant donné la relation entre les échelles régionale, nationale et mondiale citée au chapitre 6, il est recommandé d'adopter une approche intégrée et qualitative, reposant sur des avis d'experts, pour évaluer les avantages connexes dans les travaux supplémentaires qui seront menés aux échelles régionale et nationale. Cette approche est peut-être la méthode la plus pratique et la plus productive pour régler les nombreuses incertitudes et lacunes citées dans le présent document. La question est moins de savoir s'il faut ou non effectuer une évaluation à l'échelle régionale, mais plutôt quelle est la région du Canada qui s'y prête le mieux. Premièrement, cette région doit présenter la plupart, si ce n'est la totalité, des caractéristiques régionales décrites au chapitre 6, de sorte que l'évaluation menée à l'échelle régionale puisse compléter le mieux possible celle effectuée à l'échelle nationale. Deuxièmement, il faudra avoir des renseignements détaillés sur les polluants atmosphériques critères (émissions et qualité de l'air ambiant), les substances toxiques, les écosystèmes terrestres et aquatiques, l'environnement (agriculture ou foresterie), le bien-être collectif et la santé humaine. En raison des contraintes en matière de temps et de ressources, il sera nécessaire d'agir de façon rapide et efficace pour obtenir des conclusions qui puissent être présentées à la réunion conjointe des ministres de l'Environnement prévue pour décembre. Nous aurons besoin d'une équipe de recherche solide, qui puisse réunir les avis d'experts scientifiques appropriés, pour évaluer qualitativement les incidences et les effets des options proposées par les tables de concertation en vue de réduire les émissions de GES. Troisièmement, la région choisie devra être suffisamment grande pour que les mesures prises pour y réduire les émissions de GES produisent des avantages en quantités suffisantes aux échelles régionale et nationale. Toutefois, cette région devra permettre, en même temps, de tirer des leçons applicables dans tout le reste du Canada.

On propose la région de Toronto-Niagara pour l'étude de cas en question. Elle répond à la plupart, sinon à la totalité, des critères traités au chapitre 6, en plus de ceux cités dernièrement. Qui plus est, elle a déjà fait l'objet d'un examen approfondi du point de vue de la pollution atmosphérique et de la santé humaine. L'Ontario Medical Association a estimé que 1 800 décès prématurés qui surviennent chaque année en Ontario peuvent être attribués aux particules mais cette affirmation est contestée (MacPhail *et al.*, 1998). De façon similaire, une grande partie des 16 000 décès prématurés dus à la pollution atmosphérique au Canada surviennent, d'après les estimations, dans le sud de l'Ontario (gouvernement du Canada, 1998). De nouvelles préoccupations régionales concernant la qualité de l'air ont été à l'origine de la prise de nombreuses mesures à l'échelle provinciale (p. ex., le programme Air pur, qui vient tout juste d'être établi), ainsi que d'évaluations à l'échelle municipale (Pengelly *et al.*, 1997). Il est possible de tirer profit de la synergie de la recherche et des politiques élaborées dans la région pour améliorer la qualité de l'air, en liant ces initiatives et les mesures prises pour réduire les émissions de GES.

La région fait aussi l'objet d'une étude multipartite d'Environnement Canada portant sur les changements atmosphériques (voir Mills et Craig, 1999). Cette évaluation des émissions et des incidences (et des effets), des problèmes atmosphériques intégrés, a dépassé le stade expérimental (Ogilvie *et al.*, 1997), et est actuellement dans la deuxième année de son plan de travail quinquennal. De nombreux avis d'experts ont été réunis aux fins de cette étude, provenant notamment de scientifiques de divers services d'Environnement Canada, de partenariats avec des administrations municipales et des gouvernements provinciaux, ainsi que de collaborations avec de nombreuses universités et de nombreux diplômés. Nombre de plans de travail sont déjà appuyés dans le cadre de cette initiative : recherche sur les écosystèmes et la biodiversité, élaboration de cadres d'évaluation des écosystèmes et des milieux urbains, cartographie intégrée des écosystèmes et des problèmes atmosphériques, santé humaine, énergie. Dans ce dernier

cas, le projet du PRDE no 24114 a fait l'objet d'un financement pour la conduite de recherches sur les changements climatiques et l'énergie dans la région de Toronto-Niagara, auxquelles des intervenants prendront part. Ce projet concerne en particulier les incidences et des questions relatives aux émissions dans le secteur de l'énergie, et complète donc directement les travaux sur les avantages, proposés pour la phase II (Auld *et al.*, 1999).

L'Étude de la région de Toronto-Niagara (RTN) a aussi une étroite relation de travail avec Pollution Probe, une organisation non gouvernementale de l'environnement reconnue à l'échelle nationale. Cette relation apporte une expertise considérable dans le traitement des questions liées aux avantages connexes, étant donné les travaux que l'organisme a déjà effectués par le passé dans le domaine des changements climatiques (Ogilvie *et al.*, 1997), du transport (Roberts, 1998), des émissions des centrales au charbon (Love *et al.*, 1998), de la santé des enfants et de la qualité de l'air (Hancock, 1998). L'organisme est également représenté à six des tables de concertation et assure la coprésidence de la Table des transports. De plus, Pollution Probe, en tant qu'ONGE, apporte une visibilité et une crédibilité énorme à la question auprès du public. Cet aspect est particulièrement important pour aider à faire connaître les résultats de la phase II et à optimiser leur acceptation auprès des individus, des entreprises, des organismes et des collectivités, à la fois dans la région et dans tout le pays.

Dans la phase II du plan d'action, on propose d'entreprendre une évaluation qualitative des incidences et des effets de la réduction des émissions de GES à l'échelle nationale, en plus d'une analyse à l'échelle régionale (prenant la région de Toronto-Niagara comme étude de cas). L'évaluation sera effectuée par une équipe d'experts scientifiques qui connaissent bien la situation aux échelles régionale et nationale et qui étudieront, d'une perspective qualitative, les incidences et les effets éventuels des mesures proposées par les tables de concertation pour réduire les émissions de GES. Cette évaluation se déroulera selon cinq grands orientations :

- Se concentrer sur l'estimation des incidences et des effets sur les écosystèmes, l'environnement, le bien-être collectif, la santé humaine et les mesures prises pour réduire les émissions de GES, de même sur l'attribution de valeurs relatives à ces avantages.
- Estimer la valeur de la gamme complète des avantages connexes des mesures qui sont le plus susceptibles d'être adoptées dans une stratégie nationale de mise en œuvre.
- Évaluer les options relatives aux GES proposées par les tables de concertation respectives en termes d'avantages connexes, et préparer une analyse qualitative dont les conclusions pourront être présentées en décembre 1999.
- Entreprendre simultanément cette évaluation à une échelle régionale centrée sur une ville, où la méthode peut être perfectionnée et des leçons importantes tirées.
- Situer cette évaluation régionale dans un contexte national, et trouver d'autres régions du Canada où des évaluations similaires devraient être mises en œuvre.

Bibliographie

Abt Associates Inc., 1998: *Quantifying Co-Control Benefits of Reducing Greenhouse Gas Emission.* Final Report prepared for the U.S Environmental Protection Agency, 10 pp.

Administration Economic Analysis, 1998: *The Kyoto Protocol and the President's Policies to Address Climate Change*, July, www.epa.gov:80/oppeoee1/globalwarming/reports

Alfsen, K.H., A. Brendemoen, and S. Glomsrod, 1992: *Benefits of climate policies: Some tentative calculations*, Discussion Paper No. 69, Norwegian Central Bureau of Statistics, Oslo.

Amano, A., 1994: *Estimating secondary benefits of limiting CO_2 emissions in the Asian region,* mimeo, School of Business Administration, Kobe University.

Anlauf, K., 1999: *Pers. Comm.* Processes Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario.

Auld, H., Chiotti, Q. and A. Maarouf, 1999: Climate and energy in the Toronto-Niagara Region: integration of science and policy, *Proposal for the Interdepartmental Panel on Energy Research and Development (PERD).* Project number 24114, Atmospheric Environment Program, Environment Canada – Ontario Region and the Adaptation and Impacts Research Group, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario.

Austin, D., A. Krupnick, D. Burtraw and T. Stoessell, 1998: *The Benefits of Air Pollutant Emissions Reduction in Maryland: Results from the Maryland Externalities Screening and Valuation Model.* Resources for the Future, http:/www.rff.org, 29 pp.

Ayres, R.U. and W. Jörg, 1991: The greenhouse effect: damages, costs and abatement. *Environmental and Resource Economics*, **1,** 237-270.

Barclay, J. 1998a. Integrating Other Air Issues into the Climate Change national Implementation Strategy. Draft Discussion Paper. Global Air Issues Branch, Environmental Protection Service, Environment Canada, Hull, Quebec.

Barclay, J. 1998b. *Pers. Comm. Global* Air Issues Branch, Environmental Protection Service, Environment Canada, Hull, Quebec.

Barker, T., 1993: *Secondary benefits of greenhouse gas abatement: The effects of a UK carbon/energy tax on air pollution,* Energy Environment Economy Modelling Discussion Paper No. 4, Department of Applied Economics, University of Cambridge.

Bayley, S.E., R.S. Behr, and C.A. Kelly, 1986: Retention and release of sulphur from a freshwater wetland. *Water Air Soil Pollution.* **31,** 101-114.

Bein. P. 1997: *Monetization of Environmental Impacts of Roads.* Highway Planning and Policy Branch Information Management Section. BC Ministry of Transportation.

Berry, T., 1988: *The Dream of the Earth*, Sierra Club Books, San Francisco, CA, 247 pp.

BMA (British Medical Association), 1998: *Health and Environmental Impacts Assessment: An Integrated Approach,* Earthscan, London, 243 pp.

Brklacich, M; C. Bryant; B. Veenhof et A. Beauchesne. 1998. Répercussions du changement climatique mondial sur l'agriculture canadienne : Revue et évaluation de la recherche entre 1984 et 1997. *L'Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*, Vol. VII.

Brun, S.E., 1997: Atmospheric, hydrologic and geophysical hazards. In: *Coping with Natural Hazards in Canada: Scientific, Government and Insurance Industry Perspectives* [Brun, S.E., D. Gesink, L. Wallace, D. Etkin and R. White (eds.)]. Round Table on Environmental Risk - Natural Hazards and the Insurance Industry, Toronto, Ontario, pp. 15-45.

Burnett, R.T; S. Cakmak and J.R. Brook, 1998: The effect of the urban ambient air pollution mix on daily mortality rates in 11 Canadian cities. *Canadian Journal of Public Health.* **89,** pp. 152-156.

Burnett, R.T.; S. Cakmak, J. Brook and D. Krewski. 1997: The Role of Particulate Size and Chemistry in the Association between Summertime Ambient Air Pollution and Hospitalization for Cardiorespiratory Diseases. *Environmental Health Perspectives,* Vol **105**(6): 614-620.

Burtraw, D. and M.A. Toman. 1997. *The Benefits of Reduced Air Pollutants in the US. From Greenhouse gas Mitigation Policies.* Internet Edition revised. Resources for the Future. http:/www.rff.org, 28 pp.

CCME. 1995: *Rapport présenté au Conseil canadien des ministres de l'Environnement par le Groupe d'étude sur les véhicules et les carburants moins polluants.* Environnement Canada, http://www.ec.gc.ca/oged%2Ddpge/level3e/ccme1_3e.html

Chappelka, A.H. and P.H. Freer-Smith, 1995: Predisposition of trees by air pollutants to low temperatures and moisture stress, *Environmental Pollution*, **87,** 105-117.

CHEMinfo Services Inc. and Margaree Consultants Inc., 1998: *Powering GHG Reductions Through Technology Advancement.* Environment Canada, Hull, Québec, 242 pp.

Chestnut, L.G., 1995: *Human Health Benefits from Sulfate Reductions Under Title IV of the 1990 Clean Air Act Amendments.* A final report prepared for the US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Chiotti, Q.P., 1998: An assessment of the regional impacts and opportunities from climate change in Canada, *Canadian Geographer,* **42,** 380-393.

Chiotti, Q., 1999: The Toronto-Niagara Region study: Setting and research framework, In: *Atmospheric Change in the Toronto-Niagara Region: Towards an Integrated Understanding of Science, Impacts and Responses - Proceedings of a Workshop held in Toronto, Ontario,* May 27-28, 1998. [Mills, B. and Craig, L. (eds.)], Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, at the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, pp. 1-18.

Chiotti, Q.P. and R. Bain, 1999: *Atmospheric change in the rural-urban interface: a preliminary assessment of the implications for the Toronto-Niagara region,* paper presented at the Canadian-American-Anglo-Irish-Antipodean Rural Geography Symposium "The New Countryside: Critical Questions for the Future of Rural Regions and Communities", Truro, Nova Scotia, July.

Comeau, L. 1998: Rational Energy Program – *Update and Summary of Key Measures to the year 2010.* Climate Action Network, http://www.sierraclub.ca/nationa/climate/rep98.html

Complainville, C. and J.O. Martins, 1994: *NO_X and SO_X emissions and carbon abatement.* Economics Department Working Paper No. 151, OECD, Paris.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt, 1997: The value of the World's ecosystem services and natural capital, *Nature,* **387,** 253-260.

Cox, R.M., F-R. Meng, M.Charland, R. Helleur and J.W. Malcolm, 1997: Response of mature white pine foliage to tropospheric ozone. In: *Proceedings of the Ontario Climate Avisory Committee Workshop on Atmospheric Ozone*, Environment Canada, Ministry of the Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Canadian Global Change Program, Canadian Climate Program Board, and the Ontario Agrometeorological Research and Services Committee, Ontario, pp. 100-115.

Dann, T. and P. Summers (eds) 1997: *Ground-level Ozone and its Precursors, 1980-1993: Report of the Data Analysis Working Group.* Canadian 1996 NO_X/VOC Science Assessment, 295 pp.

Demeritt, D. and Rothman, D.S. 1998. Comments on J.B. Smith (Climate Change 32, 312-26) and the Aggregation of Climate Change Damage Costs. *Climate Change* **40** (3-4), pp. 699-704.

Diener Consulting and Acres International, 1998: *Emissions Reduction Study for the Ontario Clean Air Alliance. Ontario Clean Air Alliance*, Toronto, Ontario.

Dillon, P. J., L.A. Molot and M. Futter, 1997: The effect of El NiZo-related drought on the recovery of acidified lakes. *Environmental Monitoring and Assessment,* **46,** 105-111.

Dotto, L., 1999: *Storm Warning: Gambling with the Climate of our Planet*, Doubleday, Toronto, 332 pp.

Dlugokencky, E.J., K.A. Masarie, P.M. Lang and P.P. Tans, 1998: Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden. *Nature,* **393,** 447-450.

Eaton, P.B.; A.G. Gray, P.W. Johnson and E. Hundert (eds.). 1994: *L'état de l'environnement dans la Région de l'Atlantique.* Environnement Canada. 457 p.

Easterling, W.E., M.L. Parry and P.R. Crosson, 1993: Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region. *Climatic Change*, **24,** 23-61

Environnement Canada, 1989 : Brume arctique – pollution atmosphérique visible. *L'atmosphère en évolution*, Fiche d'information En57-29/13-1989F, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ontario.

Environnement Canada, 1996 : *L'état de l'environnement au Canada.* Ministre des Travaux publices et Services gouvernementaux, Ottawa, Ontario.

Environnement Canada, 1997a : *Les pluies acides au Canada – Rapport d'évaluation de 1997, Volume deux : Atmospheric Science Assessment Report.* Environnement Canada, Downsview, Ontario. 293 p.

Environnement Canada, 1997b : *Options stratégiques pour la gestion des substances toxiques : Secteur de production d'énergie électrique à partir de carburants fossiles.* Loi canadienne sur la protection de l'environnement, Rapport sur les consultations des intervenants, Ottawa.

Environnement Canada, 1998 : *Inventaire canadien des émissions des principaux contaminants atmosphériques, 1995.* Environnement Canada, Downsview, Ontario. Décembre.

Environnement Canada, 1999 : *Inventaire national des rejets de polluants, Rapport sommaire de 1996.* Environnement Canada, Downsview, 226 pp.

Environnement Canada et USEPA, 1997 : *Stratégie binationale relative aux toxiques des Grands Lacs* – Canada-Etats-Unis. (Stratégie pour éliminer pratiquement toutes les substances toxiques persistantes des Grands Lacs). 25 p.

Evans, R. D., E.M. Addison, J.Y. Villeneuve, K.S. MacDonald and D. G. Joachim, 1997: An examination of spatial variation in mercury concentrations in otter *(Lutra canadensis)* in South-Central Ontario. In press.

Fankhauser, S., 1994: The economic costs of global warming damage: a survey. *Global Environmental Change*, **4**, 301-309.

Francis, D. and H. Hengelveld, 1998 : *Sommaire du changement climatique – Phénomènes météorologiques extrêmes et changement climatique.* Environnement Canada, Downsview, Ontario, 31 p.

Forecast Working Group. 1995: *Microeconomics and Environmental Assessment of Climate Change Measures*, Forecast Working Group of the National Air Issues Coordinating Mechanism, April 1995, pp.25-28.

Gielen, D.J., T. Gerlagh and A.J.M. Bos, 1998: *Matter 1.0: A MARKAL Energy and Materials System Model Characterisation*, ECN-C—98-065.

Gouvernement du Canada, 1997 : *La phase 2 du Plan fédéral de gestion du smog*. Environnement Canada, Ressources naturelles Canada, Transports Canada. 86 p.

Gouvernement du Canada, 1998a : *Accord Canada – Etats-Unis sur la qualité de l'air, Rapport d'étape de 1998*, Commission mixte internationale, Ottawa, Ontario, 28 p.

Government of Canada, 1998b: *Finding of Significant Contribution and Rulemaking of Certain States in the Ozone Transport Assessment Group for Purposes of Reducing Regional transport of ozone: Proposed Rule.* A submission to the Office of Air and Radiation Docket and Information Centre, US Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Greene, D.L., D.W. Jones, and M.A. Delucchi (eds.), 1997: *The Full Costs and Benefits of Transportation: Contributions to Theory, Method and Measurement.* Springer, New York, 406 pp.

Hale, B.A., D.P. Ormrod, S. Keelan, X. Hao and M. Rao, 1997: Impact of ultraviolet-B radiatopm pm agriculture: ozone and carbon dioxide as modifying factors, In: OCAC (Ontario Climate Advisory Committee), 1997: *Proceedings of the Ontario Climate Avisory Committee Workshop on Atmospheric Ozone*, Environment Canada, Ministry of the Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Canadian Global Change Program, Canadian Climate Program Board, and the Ontario Agrometeorological Research and Services Committee, Ontario, pp. 81-88.

Haites, E. 1996: Reducing Greenhouse Gas Emissions: The Additional Benefits, *Changes: An Information Bulletin on Global Environmental Change*, **4**, 1-6.

Hall, P., W. Bowers, H. Hirvonen, G. Hogan, N. Foster, I. Morrison, K. Percy, I. Cox et P. Arp, *1997 : Les pluies acides au Canada : Rapport d'évaluation de 1997 - Volume quatre - The Effects on Canada's Forests.* Ministère de l'Environnement, Service canadien des forêts, 45 p.

Hancock, T., M. Wyman and I. Morton, 1998: *The Air Children Breathe: The Effects on Their Health,* report for the conference held on January 19 and 20, 1998, Environment Canada, Downsview, Ontario, Pollution Probe and the Canadian Institute of Child Health.

Hansell, R.I.C., I.T. Craine and R.E. Byers, 1997: Predicting change in non-linear systems, *Environmental Monitoring and Assessment,* **46,** 175-190.

Hazell, S. and H. Benevides, 1998: Federal strategic environmental assessment: Towards a legal framework, *Journal of Environmental Law and Practice*, 349-377.

Santé Canada, 1998 : *Manuel sur la santé et l'environnement à l'intention des professionnels de la santé :* Santé et environnement, Santé Canada, Ottawa, Ontario.

Heck, W.W., C.S. Furiness, E.B. Cowling and C.K. Sims, 1998: Effects of Ozone on Crop, Forest, and Natural Ecosystems: Assessment of Research Needs. *Environmental Managers*, October Issue, 11- 22.

HEIAPR (Health and Environmental Impact Assessment Panel Report), 1997: *Joint Industry/Government Study: Sulphur in Gasoline and Diesel Fuels*, June 25.

Herbert, D. and I. Burton, 1995: *Estimating Costs of Adaptation to Canada's Current Climate and Trends Under Climate Change,* Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario.

Hornung, R., B. Campbell, K. McCran, B. Mitchell, A. Pape, M. Raynolds, D. Foley and D. Hocking, 1998: : *Canadian Solutions – Practical and Affordable Steps to Fight Climate Change.* David Suzuki Foundation and Pembina Institute for Appropriate Development, Vancouver, British Columbia and Drayton Valley, Alberta, 102 pp.

Houghton, J.J., L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris., A. Kattenberg and K. Maskell, (eds.), 1996: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

Houle, D., R. Paquin, C. CamirJ, R. Ouimet and L. Duchesne, 1997: Response of the Lake Clair watershed (Duchesnay, Quebec) to changes in precipitation chemistry (1988-1994). *Canadian Journal of Forestry Research.* **27,** 1813-1821.

IADN, 1998. *Technical Summary of Progress under the Integrated Atmospheric Deposition Program 1990-1996.* US/Canada. IADN Scientific Steering Committee, January.

International Experts Group 3, 1991: *Comparative Environmental and Health Effects of Different Energy Systems for Electricity Generation,* Senior Expert Symposium on Electricity and the Environment, Helsinki, Findland, 13-17 May, Key Issues Paper No. 3.

IUCC (International Unit on Climate Change), 1993: The links between climate change and acid rain policies, *International Response to Climate Change*, Facts Sheet 235.

Jeffries, D.S. (sous la dir. de), 1997 : *Les pluies acides au Canada 1997 - Volume trois. The Effects on Canada's Lakes, Rivers and Wetlands.* Ministère de l'Environnement, Institut national de recherche sur les eaux, Canada. 245 p.

Keeling, R.F., E.M. McEvoy and A.C. Manning, 1999: Atmospheric oxygen concentrations at alert station in relation to the global carbon cycle. *Canadian Baseline Program Summary of Progress to 1998.* Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario, pp. 5-31 to 5-34.

Kelly, J.M., G.E. Taylor Jr., N.T. Edwards, M.B. Adams, G.S. Edwards and A.L. Friend, 1993: Growth, physiology, and nutrition of Loblolly Pine seedlings stressed by ozone and acidic precipitation: A summary of the Ropis-South project, *Water, Air and Soil Pollution*, **69,** 363-391.

Kerr, J.B. and C.T. McElroy, 1993: Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science,* **262,** 1032-1034.

Krewitt, W., F. Hurley, A. Trukenmuller, and R. Friedrich, 1998: Health risks of energy systems. *Risk Analysis*, **18** (4) 377-383.

Krupa, S.V. and Kickert, R.N., 1993: *The Effects of Elevated Ultraviolet (UV-B) Radiation on Agricultural Production,* A report submitted to the Formal Commission on "Protecting the Atmosphere", Parliament of the Federal Republic of Germany, 432 pp.

Krupa, S.V. and R.N. Kickert. 1989. The greenhouse effect: impacts of ultraviolet-b (uv-b) radiation, carbon dioxide (CO_2) and ozone (O_3) on vegetation. *Environmental Pollution.* **61,** 263-393.

Lakshmanan, T.R.; T. Nijkamp and E. Verhoef. 1997: *Full Benefits and Costs of Transportation: Review and Prospects.* In The Full Costs and Benefits of Transportation. (Eds) D.L. Greene, D.W. Jones and M.A. Delucchi. Published by Springer, pp. 387-406.

Lang, C., S. Keefe, L. Chestnut and R. Rowe, 1996: *Air Quality Valuation Model (AQVM) - Report 2: Methodology,* prepared for Environment Canada and Health Canada.

Last, J., K. Trouton and D. Pengelly, 1998: *Taking our Breath Away – The Health Effects of Air Pollution and Climate Change.* David Suzuki Foundation, Vancouver, British Columbia, 51 pp.

Leaitch, R., 1999: *Pers. Comm.* Research Scientist, Cloud Physics Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario.

Lee Davis, D., T. Kjellstrom, R. Slooff, A. McGartland, D. Atkinson, W. Barbour, W. Hohenstein, P. Nagelhout, T. Woodruff, F. Divita, J. Wislong, L. Deck and J. Schwartz, 1997: Short-term improvements in public health from global-climate policies on fossil-fuel combustion: an interim report, *The Lancet*, **350,** 1341-1348.

Liu, L. (sous la dir. de), 1997 : *Les pluies acides au Canada, rapport d'évaluation de 1997, Volume cinq: The Effects on Human Health*, Environnement Canada, Downsview, Ontario, 139 p.

Love, P., D. Pengelly, S. Labatt, K. Ogilvie, B. Lourie and B. Kelly, 1998: *Emissions from Coal-Fired Electric Stations: Environmental Health Effects and Reduction Options,* Pollution Probe and the Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Toronto, Ontairo, 50 pp.

Maarouf, A.R., and J. Smith, 1997: Interactions amongst policies designed to resolve individual air issues. *Environmental Monitoring and Assessment,* **46** (1&2) 5-21.

MacIver, D., Auld, H. et M. Taylor, 1999 : Des cartes relient l'atmosphère et la biodiversité. *Bulletin Science et environnement,* numééro 14, 8 septembre, Environnement Canada, Ottawa.

MacIver, D. et N. Urquizo, 1999 : *Changements atmosphériques au Canada : perspective intégrée. Service de l'environnement atmosphérique*, Environnement Canada, Downsview, Ontario. 28 p.

MacPhail, J., T. Boadway, C. Jacobson, and P. North, 1998: OMA *Ground Level Ozone Position Paper.* Ontario Medical Association, Toronto, Ontario.

Mahony, N., E. Nol and T. Hutchinson, 1997: Food chain chemistry, reproductive success, and foraging behaviour of songbirds in acidified maple forest of central Ontario. *Canadian Journal of Zoology*, **75,** 509-517.

Maxwell, B., N. Mayer et R. Street (sous la dir. de), 1997 : *L'Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique – Sommaire national pour les décideurs.* Environnement Canada, Downsview, Ontario, 24 p.

McCrea, R. and F. Burrows, 1998: *Pers. Comm.* Canada Centre for Inland Waters, Environment Canada, Burlington, Ont. and Pukaskwa National Park, Heron Bay, Ontario.

McNicol, D.K., M.L. Mallory, G. Mierle, A.M. Scheuhammer and A.H.K. Wong, 1997: Leeches as indicators of dietary mercury exposure in non-piscivorous waterfowl in central Ontario, Canada. *Environmental Pollution,* **95,** 177-181.

Mierle, G., 1997a: *Mercury in Ontario's Environment: Who is at Risk?*. Standard Development Branch, MOE. Aquatic Science Section. SRQ Technical Bulletin No. AqSS-7. Sep, 4 pp.

Mierle, G., 1997b: *Mercury In Ontario's Environment.* Standard Development Branch, MOE. Aquatic Science Section. SRQ Technical Bulletin No. AqSS-6. Sep, 3 pp.

Mills, B. and L. Craig (eds.), 1999: *Atmospheric Change in the Toronto-Niagara Region: Towards an Integrated Understanding of Science, Impacts and Responses - Proceedings of a Workshop held in Toronto, Ontario, May 27-28, 1998.* Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, at the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 143 pp.

Programme scientifique multipartite sur les NO_x et le COV. 1997 : *Rapport du Groupe de travail sur l'établissement* d'une norme en matière de végétation. – Évaluation scientifique 1996 sur les NO_x et les COV.

Munich Re., 1997: *Annual Review of Natural Catastrophes, 1996*. Munich Reinsurance, Munich.

Munn, R.E. (ed.), 1995: *Atmospheric Change in Canada: Assessing the Whole as Well as the Parts - Summary Report of a Workshop*, Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

Munn, R.E. (ed.), 1996: *Atmospheric Change and Biodiversity: Formulating a Canadian Science Agenda - Summary Report of a Workshop*, Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

Munn, R.E. (ed.), 1997: *Atmospheric Change in Canada: Assessing the Whole as Well as the Parts - Proceedings of a Workshop*, Environmental Monitoring and Assessment, **46** (1&2) 190 pp.

Munn, R.E., and A.R. Maarouf, 1997: Atmospheric issues in Canada. *Science of the Total Environment*, **203**, 1-11.

Nordhaus, W.D., 1994: *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA.

Novelli, P.C.; K.A. Masarie; and Pm Lang, 1998: Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 19,015-19,033.

OCAC (Ontario Climate Advisory Committee), 1997: *Proceedings of the Ontario Climate Avisory Committee Workshop on Atmospheric Ozone*, Environment Canada, Ministry of the Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Canadian Global Change Program, Canadian Climate Program Board, and the Ontario Agrometeorological Research and Services Committee, Ontario.

Ogilvie, K., D. Bell, R. White and Q. Chiotti (eds), 1997: *Climate Variability, Atmospheric Change and Human Health Conference: Proceedings*, November 4-5, 1996. Pollution Probe, Toronto, Ontario, 165 pp.

Olivotto, C. (sous la dir. de), 1997: *Résumé à l'intention des décisionnaires : synthèse des résultats clés du Programme scientifique sur les NO_X et les COV, Évaluation scientifique des NO_X et des COV au Canada en 1996*, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ontario, 79 p.

Oltmans, S.J.; A.S. Lefohn; H.E. Scheel; J.M. Harries; H.Levy II; I.E. Galbally; E.G. Brunke; C.P. Meyer; J.A. Lathrop; B.J.Johnson; D.S. Shadwick; E.Cuevas; F.J. Schmidlin; D.W. Tarasick; H. Claude; J.B. Kerr; O. Uchino; and V. Mohnen, 1998: Trends of ozone in the troposphere. *Geophysical Research Letters*, **25**, 139-142 .

Ontario Ministry of Environment and Energy, 1996: *Supporting Document for Towards a Smog Plan for Ontario*, Ontario Ministry of Environment and Energy, Toronto, Ontario.

Osborne Group; DesRosiers Automotive Consultants and Pilorusso Research & Consulting, 1995: Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Ontario Automotive Sector: Final Report to Ontario Round table on Environment and the Economy, Transportation and Climate Change Collaborative, Auto Sector Study Group.

Ottinger, R.L., D.R. Wooley, N.A. Robinson, D.R. Hodas, S.E.Babb, S.C. Buchanan, P.L. Chernick, E. Caverhill, A. Krupnick, W. Harrington, S. Radin and W. Fritsche, 1991: *Environmental Costs of Electricity*, Oceana Publications, New York, 769 pp.

Pearce, D.W., W.R. Cline, A.N. Achanta, S. Frankhauser, R.K. Pachauri, R.S.J. Tol, and P. Vellinga, 1996: The social costs of climate change: Greenhouse damage and the benefits of control. In *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J.P. Bruce, L. Hoesung, and E.F. Haites, eds.), Cambridge University Press.

Pearson, R.G., 1997: Impacts of ozone on agriculture, In: OCAC (Ontario Climate Advisory Committee), 1997: *Proceedings of the Ontario Climate Avisory Committee Workshop on Atmospheric Ozone*, Environment Canada, Ministry of the Environment, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Canadian Global Change Program, Canadian Climate Program Board, and the Ontario Agrometeorological Research and Services Committee, Ontario, pp. 89-99.

Pearson, R. G. 1989: *Impacts of Ozone Exposure in Vegetation in Ontario*. Air resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario. Report No. ARB-179-89-Phyto, p. 62.

Pengelly, D., A. Szakolcai, B. Birmingham, P. Muller, D. Cole, S. Bailey, R. Bell and A. Socha, 1997: *Human Health Risk Assessment for Priority Air Pollutants*, Hamilton-Wentworth Air Quality Initiative (HAQI), Hamilton, Ontario, 103 pp.

Pope, C.A. III; M.J. Thun; M. .M. Namboodiri; D.W. Dockery; J.S. Evans; F.E. Speizer and C.W. Heath Jr. 1995: Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 151:669-674.

Prinn, R.G., 1994: The interactive atmosphere: global atmospheric-biospheric chemistry. *Ambio*, **23,** 50-61.

Prinn, R.G., R.F. Weiss, B.R. Miller, J. Huang, F.N. Alyes, D.M. Cunnold, P.J. Fraser, D.E. Hartley and P.G. Simmonds, 1995: Atmospheric trends and lifetime of CH3CCl2 and global OH concentrations. *Science*, **269,** 187-192.

Quinet. E. 1997: Full Social Cost of Transportation in Europe. .In *The Full Costs and Benefits of Transportation.* (Eds) D.L. Greene, D.W. Jones and M.A. Delucchi. Published by Springer, pp. 69-102.

RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), 1999: *First Environmental Data Compendium, 1999.* Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment.

CCRS (Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance) *Rapport de 1990 sur le transport à distance des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides : Partie 5, Effets sur les milieux terrestres,* [Pearson, R.G. et K.E. Percy, (sous la dir. de.)], Environnement Canada, Downsview, Ontario, 79 p.

Ro, C., 1997: *Pers. Comm.* Senior Scientist. Air Quality Measurement & Analysis Research Division. Atmospheric Environment Service, Environment Canada, April 27.

Roberts, D., 1998: Trans-Action '98. *An Action Plan for a Modal Shift to Transit in the Greater Toronto Area.* Pollution Probe, Toronto.

Rodhe, H., P. Grennfelt, J. Wisniewski, C. Agren, G. Bengtsoon, K. Johansson, P. Kauppi, V. Kucera, L. Rasmussen, B. Rosseland, L. Schotter and G. Sellden, 1995: Acid Reign "95? – Conference Summary Statement. *Water, Air, and Soil Pollution.* **85,** 1-14.

Rosenzweig, C. and M.L. Parry, 1994: Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, **367,** 133-138.

Rothman, D., D. Demeritt, Q. Chiotti et I. Burton, 1998 : Évaluation des coûts liés au changement climatique : Dimensions économiques des mesures d'adaptation et des impacts résiduels au Canada, In: *Questions intersectorielles, Volume 8 de L'Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique* [Mayer, N. et W. Avis (sous la dir. de)], pp. 1-30.

Runeckles, V.C., 1984: Impact of air pollutant combinations on plants, In: *Air Pollution and Plant Life* [Treshow, M. (ed)], John Willey, pp. 239-258

Scheraga, J.D., and N.A. Leary, 1994: Costs and side benefits of using energy taxes to mitigate global climate change. In *Proceedings of the 86th Annual Conference,* National Tax Association, Washington, DC.

Scheuhammer, A.M. 1996. Influence of reduce dietary calcium on the accumulation and effects of lead, cadmium and aluminium in birds. *Environmental Pollution*, **94,** 337-343.

Scheuhammer, A.M. and P.J. Blancher, 1994: potential risk to common loons (gavia immer) from methyl mercury exposure in acidified lakes. *Hydrobiology,* **279/280,** 445-455.

Schindler, D.W., 1998: A dim future for the Boreal waters and landscapes: cumulative effects of climate warming, stratospheric ozone depletion, acid precipitation and other human activities. *Bioscience,* **48,** 157-164.

Schindler, D.W., 1999. From acid rain to toxic snow. Ambio. (In Press).

Schindler, D.W., P.J. Curtis, B.R. Parker and M.P. Stainton, 1996: Consequences of Climate Warming and Lake Acidification for UV-B Penetration in North American Boreal lakes. *Nature,* **379,** 705-708.

Schroeder, W., H.A. Steffen and J.Lu., 1999: *Mercury: Canadian Baseline Program Summary of Progress to 1998.* Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario, pp. 2-48 to 2-63.

Schweizer, B. and U. Arndt, 1990: CO_2/H_2O gas exchange parameters of one- and two-year-old needles of Spruce and Fir, *Environmental Pollution*, **68,** 275-292.

Shillington, T., D. Russell and B. Sadler, 1997: *Addressing Climate Change through Environmental Assessment: A Preliminary Guide,* prepared for the Canadian Global Change Program, Royal Society of Canada, April.

Smit, B. (ed), 1993: *Adaptation to Climatic Variability and Change: Report of the Task Force on Climate Adaptation.* Department of Geography, University of Guelph, Guelph, Ontario.

Stanners, D. and P. Bourdeau, 1995: *Europe's Environment: The Dobris Assessment.* European Environment Agency Task Force in cooperation with United Nations Economic Commission for Europe, 676 pp.

GTEA (Groupe de travail sur les émissions acidifiantes), 1997 : *Vers une stratégie natioanle sur les pluies acides.* Rapport présenté au Comité national de coordination des questions atmosphériques, Ottawa.

Tarasick, E.W., 1999: *Pers. Comm.* Experimental Studies Division, Atmospheric Environment Service, Downsview, Canada.

Taylor, M., 1999: *An Integrated Assessment Framework for Mapping Ecosystems and Atmospheric Issues,* report prepared for Science Assessment and Policy Integration, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Downsview, Ontario (forthcoming)

Groupe de travail fédéral-provincial, 1998 : *Ozone troposphérique – Objectifs nationaux en matière de qualité de l'air ambiant pour l'ozone troposphérique.* Document d'évaluation scientifique, version préliminaire.

Groupe de travail fédéral-provincial, 1999 : *Objectifs nationaux afférents à la qualité de l'air ambiant et visant les particules,* Partie I. Document d'évaluation scientifique.

Tol, R., 1995: The damage costs of climate change: Towards more comprehensive calculations, *Environmental and Resource Economics,* **5,** 353-374.

Turner, M.A., G.G.C. Robinson, B.J. Hann, B.E. Townsend and J.A. Amaral, 1995: ecological effects of blooms of filamentous green algae in the littoral zone of an acid lake. *Can. J. Fish, Aquat. Sci.* **52,** 2264-2275.

UNEP, 1993: The links between climate change and acid rain policies, *International Response to Climate Change, Fact sheet 235,* Information Unit of Climate Change (IUCC).

UNEP/GEMS, 1987: *The Greenhouse Gases.* Environmental Library No.1, 40pp.

USEPA, 1997: *The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1970 to 1990.* Prepared for U.S. Congress by the U.S. Environmental Protection Agency, 132 pp. www.epa.gov/airprogm/oar/sect812/copy.html

van de Staaij J.W.M., G.M. Lenssen, M. Stroetenga and J. Rozema, 1993: The combined effects of elevated CO_2 levels and UV-B radiation on growth characteristics of *Elymus athericus (E. pycnanathus), Vegetation,* **104/105,** 433-439.

Wardle, D.I., J.B. Kerr, C.T. McElroy et D.R. Francis, 1997: *La science de l'ozone : perspective canadienne sur la couche d'ozone.* Protocole de Montréal, Environnement Canada, 119 p.

Watmough, S. and T. Hutchinson. 1998. *Final Report on the Dendrochemistry of Declining Sugar Maple in Central Ontario.* Contracted project to the Ecological Monitoring Coordinating Office, Environment Canada, Burlington, Ont.

Watson, R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H. (eds.) 1996: *Climate Change 1995 - Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Wilby, K., G. Wood et D. Galarneau, 1997 : *Évaluation scientifique 1996 sur les NOx et les COV : Rapport du Groupe de travail sur l'établissement d'une norme en matière de santé,* Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ontario, 109 p.

Wood, C.W.; H.A. Torbet; H.H. Rogers; G.B. Runion; and S.A. Prior. 1994. Free-air CO_2 enrichment effects on soil carbon and nitrogen. *Agricultural and Forest Meteorology* **70,** 103-116

Glossaire

µg.g^{-1} – Microgrammes par gramme.

µmg/m^3 – Microgramme par mètre cube

1,3-butadiène – C_4H_6. Un composé cancérogène.

Action synergique – Action plus importante que les effets cumulatifs, par exemple lorsque la toxicité conjointe de deux composés dépasse la somme de leurs toxicités respectives.

ADN – (Acide désoxyribonucléique) Matériel génétique des organismes vivants et de nombreux virus.

Avantages concomitants – Effets potentiels d'une réduction des émissions de GES donnant lieu à des avantages nets dans d'autres domaines.

B[a]P – Benzo[a]pyrène. Un composé toxique.

Bioaccumulation – Phénomène en vertu duquel les organismes vivants ingèrent et gardent certaines substances chimiques, soit directement de l'environnement, soit indirectement des aliments qui en renferment.

Biote – Ensemble des organismes peuplant un écosystème, y compris les bactéries et d'autres microorganismes, les plantes et les animaux.

CAI – Consentement à accepter une indemnité.

Catalyser – Modifier la vitesse d'une réaction chimique en ajoutant une petite quantité d'une substance dont la nature restera inchangée au terme de la réaction.

Cations basiques – Ions à charge positive comme l'hydrogène et l'ammonium de calcium.

CC – Chlorocarbones.

CCNPA – Comité de coordination national sur les problèmes atmosphériques.

CCNUCC – Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

CFC – Chlorofluorocarbones. Série de gaz artificiels composés de chlore, de fluor et de carbone. Avec les halons, l'une des principales causes de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique.

CH_4 – Méthane. Gaz à effet de serre libéré dans l'atmosphère par des sources écologiques comme les terres humides, le fumier, les rizières, les dépotoirs, les mines de charbon, les fuites des puits de gaz naturel et les gazoducs.

Charge critique – Taux de dépôt le plus élevé auquel on n'observe pas d'effets nocifs.

Chloroplaste – Plastide renfermant de la chlorophylle. Il sert à la photosynthèse et à la production d'amidon.

Chlorose – Jaunissement ou décoloration des organes végétaux habituellement verts pour des raisons autres que l'absence de lumière.

Chrome – Métal dur et blanc présent dans le minerai de chrome-fer, toxique pour les plantes et les animaux.

CO – Monoxyde de carbone. Gaz incolore, inodore et insipide résultant principalement de la combustion incomplète des combustibles fossiles (surtout dans les automobiles). À faible concentration, le CO ralentit les réflexes et estompe les sens; très concentré, il peut faire sombrer dans le coma et entraîner la mort.

CO_2 – Dioxyde de carbone. Gaz à effet de serre libéré dans l'atmosphère par des mécanismes naturels et les activités humaines.

COD – Carbone organique dissous.

COV – Composés organiques volatils. Gaz organiques comme le propane et le benzène qu'on retrouve dans la vapeur de diverses substances comme l'essence, de nombreux solvants et les peintures à l'huile.

DDT – Dichlorodiphényltrichloroéthane. Insecticide synthétique persistant, qui a tendance à s'accumuler. On sait qu'il induit le cancer. Prohibé depuis 1974. Les fabricants avaient jusqu'en décembre 1990 pour écouler leurs stocks.

ECV – Évaluation du cycle de vie.

Effets externes – Effets ou incidences qui ne résultent pas de la réduction des émissions ni d'une amélioration de la qualité de l'air en soi, mais dérivent des mesures prises, par exemple bienfaits d'une modification des moyens de transport pour la santé.

EIE – Évaluation des incidences environnementales.

EIS – Étude d'impact sur la santé.

ERS – Évaluation des répercussions sociales.

ESIE – Évaluation stratégique des incidences environnementales.

Forçage radiatif – Perturbation du flux net des rayonnements solaires et infrarouges (thermiques) normalement en équilibre dans la troposphère par les gaz libérés au cours des activités industrielles.

GAM – Groupe d'analyse et de modélisation.

GES – Gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone, l'oxyde nitreux et les hydrocarbures halogénés. Ces gaz absorbent les rayonnements de grande longueur d'onde dans l'atmosphère et les renvoient vers la Terre.

GIEC – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Groupe d'étude sur le changement du climat mondial mis conjointement sur pied, en 1988, par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement en vue de rassembler les meilleurs scientifiques de 30 pays.

H_2O_2 – Radical peroxy.

HAP – Hydrocarbures aromatiques polycycliques. Le plus vieil agent cancérogène connu pour les humains. Ils sont libérés pendant la combustion des combustibles fossiles. Leurs sources comprennent les centrales thermiques, les fours de cokéfaction, les eaux usées, la fumée du bois et les huiles de graissage usées.

HCB – Hexachlorobenzène ($C_6CH_6Cl_6$). Insecticide systémique (qui affecte tout un système de l'organisme, le système nerveux, par exemple) utilisé pour combattre les mouches, les blattes, les pucerons et les anthonomes. On l'appelle aussi hexachlorure de benzène.

HCNM – Hydrocarbures non méthaniques.

kt – 1 000 tonnes.

MEQA – Modèle d'évaluation de la qualité de l'air.

Mercure (Hg) – Métal lourd liquide de couleur argentée présent à l'état naturel dans le cinabre. On s'en sert dans les baromètres, les thermomètres et les amalgames. Toxique pour les plantes aquatiques et les animaux. S'accumule dans les sédiments et les maillons de la chaîne alimentaire.

Métaux lourds – Métaux à poids atomique relativement élevé (densité supérieure à 5,0) comme le cadmium, le plomb et le mercure.

Méthylmercure – CH_3Hg. Radical alkyle dérivé de la combinaison du méthane avec le mercure.

MPE – Modèle de prévision des émissions.

N_2O – Oxyde nitreux. Un gaz à effet de serre essentiellement libéré lors de la détérioration des sols agricoles.

Nécrose uni-bifaciale – Phénomène où le tissu d'une feuille meurt d'un côté ou des deux côtés en raison d'un facteur externe comme l'ozone. Il se caractérise par une décoloration brune ou noire.

nm – Nanomole. Une unité utilisée en chimie.

NO_x – Oxydes d'azote. Groupe de gaz libérés lors de la combustion des combustibles fossiles, des feux de forêt, des orages (foudre) et de la décomposition de la végétation. Le dioxyde d'azote (NO_2), un gaz rouge brun à odeur désagréable, est l'une des principales composantes du smog.

O_3 – Ozone. Gaz bleuté, à odeur piquante, qui pollue les couches basses de l'atmosphère en permettant aux oxydes d'azote et aux composés organiques volatils de se combiner sous l'effet des rayons solaires. Il fait partie des gaz à effet de serre. Il est naturellement synthétisé aux altitudes de plus de 20 km où il protège la biosphère contre les effets dommageables des rayons ultraviolets.

OB – Organo-brome.

OH – Radical hydroxyle.

Oligotrophe – Se dit d'un cours d'eau très pauvre en substances nutritives. Cet état est déterminé par la concentration moyenne de phosphore total et la croissance des algues (productivité) auquel contribue le phosphore.

PCCEG – Programme canadien des changements à l'échelle du globe. Ce programme, créé en 1985 sous l'égide de la Société royale du Canada, sert à coordonner les résultats, les idées et les recommandations des chercheurs et des membres de la collectivité et à les communiquer aux auteurs de politiques.

Phytoplancton – Plantes aquatiques microscopiques. Partie végétale du plancton. Plantes qui flottent librement dans l'eau parmi lesquelles on trouve une multitude d'algues et de diatomées.

P – Particules.

P_{10} – Particules de moins de 10 microns.

$P_{2,5}$ – Particules de moins de 2,5 microns.

Polluants toxiques – Dioxines et furannes chlorés, acétaldéhyde, formaldéhyde, HAP, métaux lourds.

POP – Polluant organique persistant.

ppb – Parties par milliard.

ppm – Parties par million.

ppmv – Parties par million par volume

Résistance stomatique – Mécanisme qui interdit l'échange de gaz entre l'atmosphère et les espaces intercellulaires de la feuille grâce à de minuscules ouvertures dans l'épiderme de la plante.

Sénescence – Phase de la croissance des plantes allant de la maturité à la mort. Elle se caractérise par une accumulation de produits du métabolisme, une hausse du taux de respiration et une diminution du poids sec, surtout au niveau des feuilles et des fruits.

SO_2 – Dioxyde de soufre. Gaz incolore, à odeur piquante, qui irrite les voies respiratoires supérieures de l'être humain et est à l'origine des dépôts et des pluies acides.

SO_x – Oxydes de soufre. Groupe de gaz libérés pendant la combustion des combustibles fossiles et par des sources naturelles tels les volcans.

Stratosphère – Couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km au-dessus de la surface terrestre. La température y augmente avec l'altitude. On y trouve l'ozone stratosphérique qui absorbe les rayons ultraviolets potentiellement dangereux.

TGD – Transport à grande distance.

Thermocline – Couche d'eau dans un lac ou une étendue d'eau thermiquement stratifiés qui sépare une zone supérieure, plus chaude et plus légère, riche en oxygène, d'une zone inférieure, plus lourde et pauvre en oxygène. Plus précisément, strate où la température de l'eau diminue d'au moins un degré Celsius avec chaque mètre supplémentaire de profondeur.

Toxaphène – C6H10Cl8. Composé organochloré toxique utilisé comme insecticide.

TPS – Total des particules en suspension.

Troposphère – Couche la plus basse de l'atmosphère. Elle part du sol jusqu'à une altitude d'environ 11 km au-dessus de la surface terrestre. On y retrouve environ 95 % de l'air. Elle se termine à la tropopause, point où la température commence à augmenter au lieu de diminuer à mesure qu'on s'éloigne de la Terre.

USEPA – United States Environmental Protection Agency.

UV-B – Rayons ultraviolets dont la longueur d'onde est supérieure à 290 nm ou égale et inférieure à 315 nm.

VDP – Volonté de payer.

Zooplancton – Animaux microscopiques qui se déplacent passivement dans les écosystèmes aquatiques.